

Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II

MÉMOIRE

Analyse du fonctionnement des instruments de musique à vent

présenté pour l'obtention
de l'Habilitation à Diriger des Recherches

Christophe Vergez

soutenu publiquement le 22 juin 2010

devant le jury composé de

M. J. Antunes (rapporteur)	Principal Researcher, Applied Dynamical Lab., ITN, Sacavém
M. M. Campbell (rapporteur)	Professeur, Université d'Edimbourg
M. X. Pelorson (rapporteur)	Directeur de Recherche CNRS, GIPSA-Lab, Grenoble
M. U. Ehrenstein (examineur)	Professeur, Université de Provence/IRPHE, Marseille
M. J. Gilbert (examineur)	Directeur de Recherche, CNRS, LAUM, Le Mans
M. J. Liandrat (examineur)	Professeur, Ecole Centrale de Marseille
M. J. Kergomard (conseiller d'habilitation)	Directeur de Recherche, CNRS, LMA, Marseille

à Billy Tassion

Table des matières

I	Dossier scientifique	7
1	Introduction	11
	Les instruments à vent : des systèmes bouclés exciteur/résonateur	11
2	Expérimentation - Modélisation	15
2.1	Introduction	15
2.2	Comment caractériser l'exciteur non linéaire ?	16
2.2.1	L'étude du système bouclé en quasi-statique (ex. hautbois)	16
2.2.2	Caractérisation en boucle ouverte par forçage (ex. flûte)	23
2.2.3	Un exemple où les deux approches sont nécessaires (ex. clarinette)	26
2.3	Où s'arrête l'instrument, où commence l'instrumentiste ? (ex. saxophone)	28
2.4	Nouvelle plateforme expérimentale : bouche artificielle asservie	30
2.4.1	Motivations	30
2.4.2	Principe de la régulation de pression	32
2.4.3	Difficultés et stratégies de contrôle développées	33
2.4.4	Caractériser l'influence du travail du facteur (ex. flûte à bec)	37
2.4.5	Caractériser l'influence des paramètres de contrôle (ex. clarinette)	39
2.5	Perspectives	40
3	Réduction de modèle : de l'analyse à la synthèse	43
3.1	Introduction	43
3.2	Réduction par différentes approches modales	44
3.2.1	Réduction par projection modale sur les modes du résonateur	45
3.2.2	Réduction par projection sur les POM	45
3.2.3	Réduction à l'aide d'un unique mode non linéaire	48
3.2.4	Synthèse : réduction de modèle appliquée aux instruments à vent	51
3.3	Réduction d'une EDP de transport non linéaire amorti en un système entrée-sortie : application au cuivrage	53
3.4	La synthèse sonore : un cas particulier de réduction	55
3.4.1	Introduction	55
3.4.2	Exemples de synthèse sonore et différentes utilisations	56
3.4.3	Contrôle de la synthèse sonore	58
3.5	Discussion : deux défis pour la synthèse sonore	61

3.5.1	De bons candidats pour des applications musicales grand public ?	61
3.5.2	De bons candidats pour une aide à la facture ?	62
3.6	Perspectives	63
4	Régimes d'oscillation, bifurcations	65
4.1	Introduction	65
4.2	Analyse des conditions d'émergence du son : différents points de vue	66
4.2.1	Approche automatique : systèmes bouclés et schémas blocs	67
4.2.2	Approche systèmes dynamiques : étude paramétrique des seuils	70
4.2.3	Approche mathématiques appliquées : spectre des instruments à anche au voisinage du seuil	72
4.3	Inspecter les caractéristiques de régimes établis	74
4.3.1	Équilibrage harmonique numérique : régime périodique et stabilité	74
4.3.2	Approche par perturbation du mouvement de Helmholtz	75
4.3.3	Régimes non nécessairement périodiques : du silence au chaos	77
4.4	Diagrammes de bifurcation	78
4.4.1	Introduction : notion de branche solution et de continuation	80
4.4.2	MAN et équilibrage harmonique purement fréquentiel	81
4.4.3	Alternative à l'équilibrage harmonique : MAN et continuation d'orbites temporelles	84
4.4.4	Cas particulier de continuation : la continuation de bifurcations	86
4.5	Perspectives	87
5	Conclusion	91
6	Bibliographie	97
	Bibliographie personnelle	98
	Bibliographie générale	105
7	Annexe scientifique	117
7.1	Modélisation d'un instrument à anche simple	118
7.1.1	Modèle à trois équations	118
7.1.2	Modèle à deux équations	119
7.1.3	Décomposition modale (modes réels ou complexes)	119
7.1.4	Modèle de clarinette de Raman	120
7.2	Modèle de cuivre utilisé dans les §3.2.1 et §4.2.2	122
II	Parcours du candidat	123
8	Curriculum Vitae	125
	Encadrement de la recherche	127
	Enseignement	130
	Logiciels	131
	Divers	132

Première partie

Dossier scientifique

AVANT PROPOS

La rédaction de ce mémoire est l'occasion pour moi de faire le point, dix ans après la soutenance de thèse, sur mes activités de recherche. Le but de ce texte est d'abord de proposer au jury une lecture synthétique et cohérente du travail effectué. A défaut d'être exhaustif, le document permet d'illustrer les différents aspects de mon travail. Il éclairera peut-être aussi certains collègues sur ce que sont les questions posées par la physique des instruments de musique à vent, et les recherches mises en oeuvre pour tenter d'y répondre.

La plupart du temps, pour accéder aux détails techniques, des liens sont faits vers les articles correspondants. Cependant, dans certains cas il m'a semblé intéressant sur des exemples typiques d'illustrer un peu plus en détail mon travail. Le lecteur est parfois renvoyé à des annexes scientifiques, en particulier pour les équations de certains modèles d'instruments.

Sauf mention contraire, les figures sont extraites de publications auxquelles j'ai participé et sont reproduites à l'identique. Ceci peut expliquer les inhomogénéités de notation d'une figure à l'autre.

Les articles auxquels j'ai participé sont numérotés (ex : [1], [2], ...) et la liste est consultable au chapitre 6 (page 98). Les autres articles sont référencés en utilisant un style alphanumérique (ex : [DGO03]) et constituent la bibliographie générale (page 105).

Remerciements :

Je remercie les membres du jury, rapporteurs et examinateurs pour avoir accepté d'évaluer ce rapport.

Nombreux sont les travaux présentés ici qui sont le fruit de collaborations avec des collègues. Ces collaborations contribuent à élargir mes points de vues et enrichir mes réflexions. Elles sont une composante essentielle de ma façon d'aborder les problèmes aujourd'hui, et j'ai essayé de rendre compte de leur importance dans ce document. Ainsi, au début de chaque paragraphe, j'ai noté les noms des collaborateurs principaux : étudiants en thèse ou en post-doc, ou collègues. Afin de ne pas alourdir le document, les contributions (trop nombreuses) des stagiaires ne sont pas systématiquement citées, mais il suffit de se reporter à la liste des stage encadrés page 127 pour en prendre connaissance. Que tous soient remerciés pour leurs contributions, passées, présentes et futures !

Chapitre 1

Introduction

La physique des instruments de musique a attiré l'attention de grands noms de la physique depuis des siècles (la thèse de F. Silva [Sil09, p12] dresse un rapide bilan des contributions majeures en ce qui concerne les instruments à vent). Pourquoi? Sans doute les instruments de musique intriguent-ils le chercheur : on peut les fabriquer et les utiliser avec succès sans comprendre leur fonctionnement, situation singulière pour une invention humaine! Là où facteurs et instrumentistes ont choisi une approche par essais-erreurs pour progresser (avec le succès que l'on sait), les scientifiques procèdent selon une démarche plus classique en physique : modèles et expériences s'enrichissent mutuellement, des analyses mathématiques permettent de faire parler les modèles en révélant des détails de leur comportement, suscitent parfois de nouvelles expériences ... Une spécificité importante, et d'ailleurs longtemps éludée, est la présence du musicien comme partie intégrante de l'objet de recherches.

Les études présentées dans ce mémoire visent à mieux comprendre le fonctionnement des instruments de musique et en particulier leurs aspects non linéaires. Ces travaux sont motivés par la volonté d'explorer les liens entre les paramètres géométriques de l'instrument (fixés par le facteur), les paramètres de contrôle (ajustés en temps réel par l'instrumentiste) et les caractéristiques du son produit. Nos travaux se concentrent sur les instruments à vent : à anche simple (ex : clarinette, saxophone), à anche double (ex : hautbois), cuivres (ex : trompette), à jet d'air oscillant (ex : flûtes, certains tuyaux d'orgues). Les travaux, de nature expérimentale, numérique ou théorique, s'organisent selon trois directions détaillées ci-dessous : "Expérimentation/modélisation", "Réduction de modèle", "Régimes d'oscillation et bifurcations".

Expérimentation/Modélisation (chapitre 2)

Depuis Helmholtz, il est connu que le fonctionnement des instruments de musique repose sur la structure présentée en Fig.1, i.e. un système à boucle de rétro-action où se couplent les dynamiques d'un excitateur (anche, archet, lèvres, plectre, jet d'air) et d'un résonateur (tuyau, corde, membrane ...). A cela, s'ajoute le rayonnement acoustique grâce auquel nos oreilles reçoivent les sons produits.

L'excitateur est en général l'élément du système bouclé qui pose le plus de difficultés : son fonctionnement est non linéaire, la mesure des quantités pertinentes est difficile ou parfois impossible, les caractéristiques changent en fonction de l'action du musicien ... Différentes approches pour caractériser l'élément excitateur sont présentées dans le cas du hautbois, de la flûte et de la

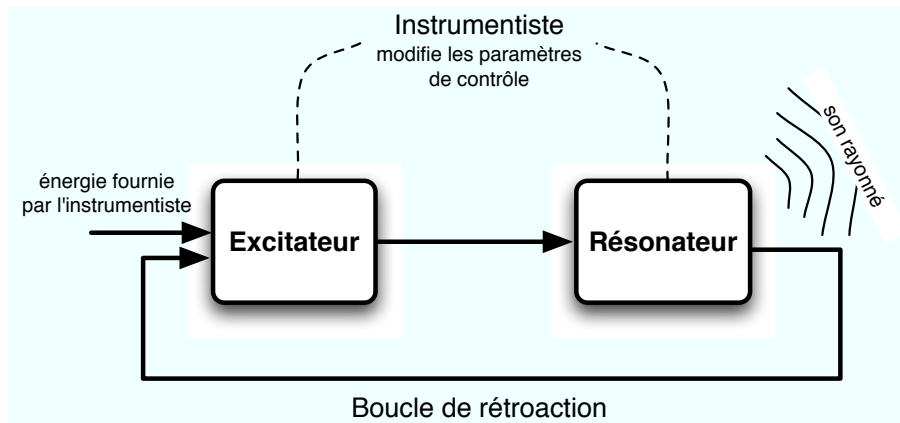


FIGURE 1.1 – Un schéma général du fonctionnement des instruments de musique à vent.

clarinette (paragraphe 2.2).

Comme dans le cas de tous les instruments entretenus (capables d’auto-osciller « spontanément » à partir d’une source d’énergie quasi-statique, par opposition aux instruments à cordes pincées, frappées, ou aux percussions), l’émission d’une note par un instrument à vent résulte d’un couplage parfois complexe entre l’excitateur et le résonateur et ne va pas de soi. Elle requiert en permanence des ajustements très fins de la part du musicien. Il en est d’ailleurs le premier conscient puisqu’il lui faut des années avant d’acquérir la maîtrise nécessaire au contrôle de son instrument. Etudier les gestes du musicien est souvent riche d’enseignements sur le fonctionnement des instruments (paragraphe 2.3).

Mais les mesures avec musicien sont aussi sources de difficultés et de limitations. L’alternative passe par l’utilisation de “bouches artificielles”, dispositifs expérimentaux qui permettent à l’instrument de jouer sans musicien. Obtenir dans ces dispositifs une pression d’air dans la bouche variable selon une consigne, est désormais possible grâce à des asservissements (paragraphe 2.4). Des mises en œuvre pour comprendre certaines pratiques de facteurs d’instruments ou de musiciens sont présentées.

Réduction de modèle : différents objectifs, différentes approches. De l’analyse à la synthèse sonore. (chapitre 3)

Dans un souci de réduction de la complexité (recherchée pour l’analyse des comportements ou la synthèse sonore temps réel), il est intéressant d’avoir une formulation minimale qui explique une grande partie du fonctionnement d’un instrument. Celle-ci peut intégrer des descriptions sommaires de l’excitateur et du résonateur, mais ne peut faire l’impasse sur la nature non linéaire de l’excitateur, et ce afin de pouvoir expliquer et reproduire le phénomène d’auto-oscillation. Dans le but de réduire le nombre de degrés de liberté du problème non linéaire couplé, plusieurs approches modales ont été explorées (paragraphe 3.2), qui font référence à des significations différentes du terme “mode” : modes de résonateur, POM, modes non linéaires.

Ces différentes études supposent que l’unique source de non-linéarité provient de l’excitateur. Le cas des cuivres à fort niveau sonore échappe à ce cadre, car le spectaculaire enrichissement spectral du son (phénomène de “cuivrage”) s’explique principalement par la propagation acoustique non linéaire dans l’instrument (le résonateur). La réduction de modèle dans ce cas, consiste

à transformer une équation aux dérivées partielles de transport non linéaire en un système entrée-sortie (paragraphe 3.3). Cette formulation condensée trouve des applications naturelles en synthèse sonore, qui représente un cas très particulier de réduction de modèle.

En effet, l'enjeu principal de la synthèse par modèle physique est de reproduire automatiquement des sons et des comportements caractéristiques du système modélisé lorsque les paramètres du modèle sont modifiés (paragraphe 3.4). Par exemple, le son émis par un modèle de trompette devient plus brillant (plus "cuivré" disent les musiciens) lorsque le niveau sonore augmente. De même, la note la plus grave jouée par un modèle de flûte passe à l'octave supérieure lorsque la pression d'alimentation augmente. Plus généralement, les régimes transitoires au début d'une note ou entre deux notes liées, sont similaires à ceux de l'instrument modélisé. Ceci, bien sûr, lorsque les phénomènes physiques responsables de ces comportements dans l'instrument réel sont identifiés et suffisamment bien modélisés par l'ensemble des équations constituant le modèle physique. Mais, pour faire d'un système d'équations un instrument de musique numérique, il faut se poser la question cruciale de son contrôle, qui peut s'envisager comme un problème direct ou un problème inverse.

Régimes d'oscillation et bifurcations (chapitre 4)

Des études théoriques et/ou numériques sont nécessaires pour comprendre, caractériser et prévoir le comportement d'un modèle (ses régimes d'oscillation) en fonction de la valeur de ses paramètres de contrôle. A commencer par l'émergence du son (paragraphe 4.2).

Ce troisième aspect de notre approche apparaît complémentaire des deux autres. En effet, un modèle physique présente souvent de nombreux régimes (paragraphe 4.3) : périodiques, quasi-périodiques, chaotiques, intermittents ... Comprendre comment sélectionner tel ou tel régime en fonction des valeurs des paramètres ou des conditions initiales est un objectif important.

Si on envisage une utilisation des modèles pour la synthèse sonore par exemple, cette richesse de comportements est une aubaine pour les musiciens lorsqu'elle est maîtrisée. Sinon elle occasionne perte de temps et frustration lorsqu'on cherche à obtenir un son ou un effet sonore particulier. Développer des modèles physiques pour la synthèse sonore sans étudier leurs comportements revient à livrer aux musiciens des instruments numériques potentiellement performants, mais sans mode d'emploi.

Si on envisage des applications à la facture instrumentale, régimes d'oscillations et bifurcations sont tout aussi importants puisqu'ils correspondent à des problématiques très pragmatiques : justesse de l'instrument, timbre, jouabilité, modes de jeu non standards ...

De plus, analyser les changements qualitatifs des comportements du modèle (c'est-à-dire ses bifurcations) constitue aussi un moyen original pour confronter un modèle à l'instrument réel. Dans ce cas en effet, on dépasse l'habituelle confrontation "point à point", qui bute souvent sur la difficile estimation des paramètres du modèle à partir de l'expérience. Grâce à l'établissement d'un diagramme de bifurcation (paragraphe 4.4), la confrontation devient "globale" et permet par exemple de baser l'évaluation sur la comparaison des possibilités de régime. On peut ainsi choisir de comparer l'évolution de certaines caractéristiques le long d'une branche solution (comme la fréquence, ou le contenu spectral) sans forcément s'attacher à la concordance des valeurs des paramètres entre expérience et théorie.

Conclusion (chapitre 5)

Enfin, nous nous risquons au chapitre 5 au difficile exercice du bilan. C'est l'occasion de préciser ma situation scientifique à la lumière de ce mémoire. Si chaque chapitre se termine par des perspectives ciblées sur les expériences ou méthodes présentées, nous esquissons ici quelques tendances plus générales.

Chapitre 2

Expérimentation - Modélisation

Sommaire

2.1	Introduction	15
2.2	Comment caractériser l'excitateur non linéaire ?	16
2.2.1	L'étude du système bouclé en quasi-statique (ex. hautbois)	16
2.2.2	Caractérisation en boucle ouverte par forçage (ex. flûte)	23
2.2.3	Un exemple où les deux approches sont nécessaires (ex. clarinette)	26
2.3	Où s'arrête l'instrument, où commence l'instrumentiste ? (ex. saxophone)	28
2.4	Nouvelle plateforme expérimentale : bouche artificielle asservie	30
2.4.1	Motivations	30
2.4.2	Principe de la régulation de pression	32
2.4.3	Difficultés et stratégies de contrôle développées	33
2.4.4	Caractériser l'influence du travail du facteur (ex. flûte à bec)	37
2.4.5	Caractériser l'influence des paramètres de contrôle (ex. clarinette)	39
2.5	Perspectives	40

2.1 Introduction

Lorsque l'objectif est de mieux comprendre le fonctionnement des instruments de musique et le rôle de l'instrumentiste, l'approche expérimentale s'impose naturellement. En la matière nous pratiquons à la fois des expériences *in vitro* (l'instrument joue, inséré dans une bouche artificielle, dispositif expérimental permettant de mettre les instruments à vent en auto-oscillation sans avoir recours à un instrumentiste) et *in vivo* (l'instrument est joué par l'instrumentiste).

L'intérêt des expériences *in vitro* est de pouvoir étudier un instrument de musique en cours de jeu sans être pénalisé par les contraintes liées à la présence d'un instrumentiste. Cela permet par exemple de caractériser les détails de l'excitateur non linéaire, comme illustré en section 2.2. Pour les expériences *in vivo*, il s'agit d'appréhender le couple instrument/instrumentiste en situation de jeu, en s'efforçant d'instrumenter et mesurer sans perturber. On peut difficilement se passer de cette approche : elle permet par exemple de mettre en évidence que l'instrument ne s'arrête pas forcément là où commence l'instrumentiste (section 2.3).

Afin de rapprocher les deux types d'expériences (in vitro, où les paramètres expérimentaux sont maîtrisés mais figés, et in vivo où les paramètres sont difficilement contrôlables mais évoluent naturellement dans le temps) nous avons récemment développé un banc d'expérience original qui va au-delà des bouches artificielles traditionnelles (section 2.4) puisqu'il permet de reproduire de manière contrôlée les variations temporelles de la pression d'alimentation en air (paramètre essentiel pour un instrument à vent). Des variations maîtrisées quasi-statiques permettent d'accéder à des diagrammes de bifurcations expérimentaux (et facilitent donc la confrontation avec des résultats théoriques) tandis que des variations plus rapides permettent de produire des transitoires d'attaque académiques ou similaires à ceux mesurés in vivo.

Les expériences sont la plupart du temps réalisées dans le cadre d'une confrontation avec un modèle existant, ou pour servir de base au développement d'un modèle.

2.2 Comment caractériser l'excitateur non linéaire ?

Même si la propagation acoustique dans les résonateurs pose encore des questions fondamentales, beaucoup d'inconnues sont relatives à l'excitateur et à la production du son, qui fait intervenir des couplages non linéaires entre acoustique, écoulement, et selon les instruments, mécanique. Plusieurs approches ont été mises en œuvre et sont présentées dans la suite pour caractériser l'excitateur.

- Souvent, le problème est abordé en quasi-statique (paragraphe 2.2.1) pour des raisons historiques, de simplicité de mise en œuvre, mais aussi parce que les modèles correspondants sont développés sous l'hypothèse d'un comportement quasi-statique.
- Pour certains instruments comme les flûtes cependant, l'approche quasi-statique n'a pas de sens car même le comportement basique de l'excitateur ne se conçoit qu'en dynamique (paragraphe 2.2.2). Dans ce cas c'est en "ouvrant" la boucle de rétro-action qu'est abordée la caractérisation de l'excitateur : le fonctionnement par auto-oscillation est remplacé par une approche par forçage.
- Enfin, nous présentons un travail récent (paragraphe 2.2.3) où les deux approches quasi-statique et par forçage sont utilisées pour caractériser respectivement les aspects aéro-élastiques et vibratoires de l'excitateur dans la clarinette.

2.2.1 Étude du système bouclé en quasi-statique : l'exemple du hautbois

Collaborateurs : A. Almeida (thèse), R. Caussé (Ircam), B. Fabre (LAM-IJLRD)

A la différence de la clarinette, le hautbois, et plus généralement les instruments à anche double¹ ont été peu étudiés. La thèse d'André Almeida ([Alm06], dir. X. Rodet et R. Caussé, Ircam) que j'ai encadrée y a été consacrée. En particulier, nous nous sommes focalisés sur l'anche double (figure 2.1), qui joue le rôle d'excitateur non linéaire, en proposant à la fois une caractérisation expérimentale et une modélisation sur le plan de la mécanique et de l'écoulement d'air (quasi-statique).

1. Un instrument à anche double est un instrument à vent dont l'excitateur est une anche formée de deux lamelles le plus souvent de roseau. Selon les instruments, l'alimentation en air est assurée par le musicien lui-même (hautbois, basson, cor anglais, cromorne ...), par une soufflerie mécanique (orgue, positif ...) ou par une soufflerie contrôlée par le musicien (cornemuse, binioù ...).

Existe-t-il des spécificités dans le fonctionnement des instruments à anche double, ou bien les modèles génériques développés pour décrire le fonctionnement des instruments à anche simple (cf. annexe 7.1) sont-ils utilisables ?

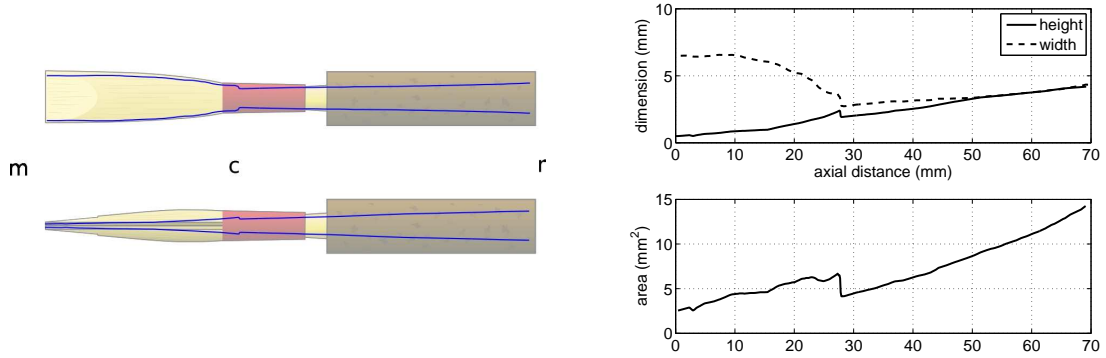


FIGURE 2.1 – **Gauche** : anche double vue sous deux angles différents, faisant apparaître la ligature (rouge) permettant de plaquer les deux lamelles de roseau sur la douille conique en laiton, ainsi que le bouchon de liège réalisant l'interface avec le corps de l'instrument. **Droite** : profils internes relevés après moulage d'une anche double. Le canal apparaît très aplati dans l'extrémité amont de l'anche et il devient presque circulaire dans la douille. La section transverse est croissante le long de l'anche excepté un décrochement à l'entrée de la douille en laiton. Figure extraite de [8].

Outils et approche

En conditions de jeu, l'anche est introduite entre les lèvres du musicien, ce qui compromet l'observation directe. De plus, aux mesures sur musiciens on préfère souvent pour l'établissement de modèles l'utilisation de bouches artificielles, pour leur capacité à garantir une mesure à paramètres de contrôles constants. Le dispositif utilisé dans cette étude est présenté en figure 2.2 et permet la visualisation de l'ouverture de l'anche. Dans toutes les expériences, nous avons eu recours à des techniques d'analyse d'image, et différents algorithmes spécifiques ont été développés : méthodes et résultats sont présentés dans l'article [9]. Les points suivants ont plus particulièrement été

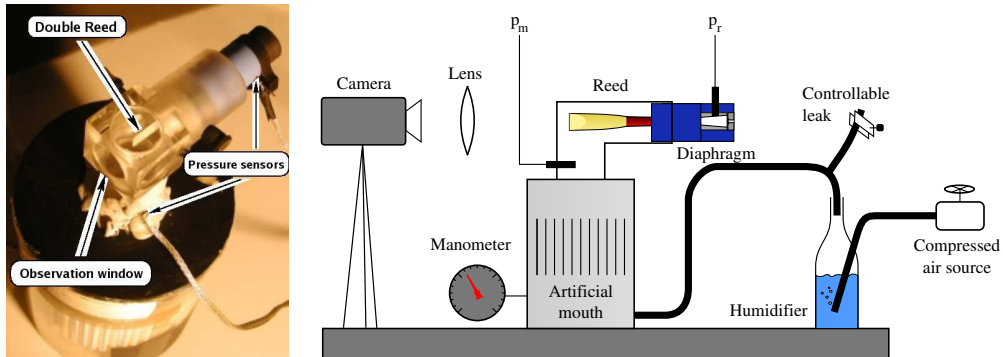


FIGURE 2.2 – **Gauche** : photo de la bouche artificielle utilisée (construction A. Terrier, figure extraite de [9]). **Droite** : schéma de l'expérience pour la mesure de caractéristiques quasi-statiques (figure extraite de [8]).

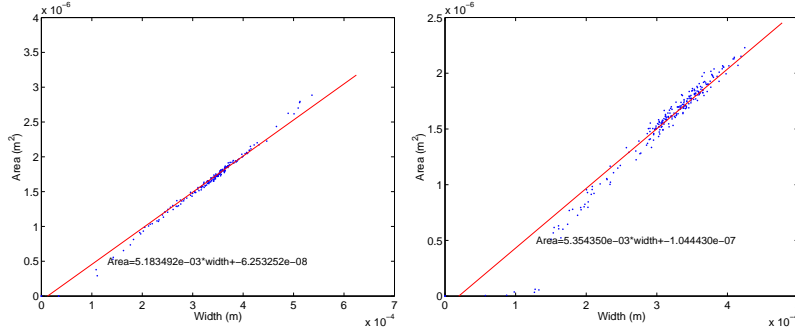


FIGURE 2.3 – Mesure de la section d’entrée d’une anche double en roseau suivant la distance maximale entre les lames : à gauche sans lèvre, à droite avec lèvres artificielles. Extrait de [9].

abordés : pertinence du modèle mécanique à un degré de liberté (évolution de la géométrie de la section d’entrée aux différentes ouvertures, existence d’une raideur équivalente quasi-statique, effets visco-élastiques), et évolution du débit d’air entrant dans l’anche en fonction de la différence de pression à ses extrémités (et ses spécificités liées à la géométrie de la douille conique).

Sur ces différents sujets, nous résumons ci-dessous les conclusions obtenues, qui permettent finalement de caractériser l’excitateur en quasi-statique.

Pertinence du modèle d’anche à 1 ddl Certains auteurs proposent qu’un modèle linéaire de ressort n’est pas applicable aux anches doubles et doit être remplacé par un modèle non linéaire. L’argument est soit d’ordre géométrique (l’aire de la section ne serait pas proportionnelle à la distance entre les anches, [BA89]), soit de nature mécanique (la force nécessaire pour fermer l’anche augmenterait au fur et à mesure que les deux anches se rapprochent, [Ned98]).

Géométrie de la section d’entrée La forme de l’ouverture de l’anche, et en particulier l’aire de cette ouverture, contrôle le débit entrant dans l’instrument. Des observations de la section d’entrée ont été réalisées en augmentant progressivement la pression dans la bouche et en empêchant l’anche de se mettre à vibrer ; ceci est réalisé en bloquant l’écoulement par un film plastique obturant la section d’entrée. Nous avons montré que l’ouverture de l’anche se réduit surtout selon sa plus petite dimension (verticale) ce qui correspond à une réduction de section proportionnelle à l’ouverture [9]. Pour illustration, la figure 2.3 présente l’aire de la section d’entrée d’une anche double en roseau en fonction de la distance maximale entre les lames. La relation de proportionnalité est claire, ce qui contredit le modèle quadratique [BA89]. Des résultats similaires ont par ailleurs été obtenus pendant l’oscillation de l’anche (au-delà de l’hypothèse quasi-statique) où la forme de la section d’entrée ne change pas significativement par rapport au cas statique.

Raideur équivalente en quasi-statique A partir des données présentées en figure 2.4 (gauche) entre les points **C** et **D**, nous avons estimé une raideur surfacique équivalente (l’hypothèse d’une loi contrainte/déformation linéaire étant visiblement raisonnable) $k_s = \frac{p}{S} \simeq 6.15 \times 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-2}$. Cette valeur peut être comparée à celle trouvée pour la clarinette par J.P. Dalmont et al. [DGO03], $k_s \simeq 0.8 \times 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-2}$. Nous nous garderons cependant d’en tirer des conclusions

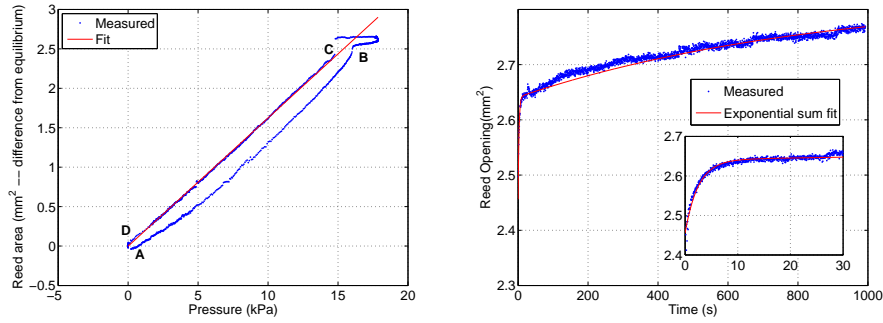


FIGURE 2.4 – **A gauche** : mesure de la différence entre la section d'entrée et la section au repos en fonction de la différence de pression de part et d'autre de l'anche (rampe ascendante de **A** à **B** et descendante de **C** à **D**) et régression linéaire entre les points **C** et **D**. **A droite** : mesure de la relaxation d'une anche de hautbois synthétique, et ajustement d'une somme de deux exponentielles faisant apparaître deux temps caractéristiques de 2.5s et 850s (en encadré le détail des premières secondes de la relaxation). Figures extraites de [9].

sur les propriétés relatives aux matériaux utilisés, car la quantité mesurée globalise certaines particularités géométriques tridimensionnelles, de même que des spécificités liées aux conditions aux limites. Une loi contrainte/déformation linéaire peut surprendre étant donné que les deux lames de roseau qui constituent l'anche double sont précontraintes et subissent de grandes déformations lors de la fermeture complète de l'anche. Ce résultat a pourtant été confirmé par des simulations numériques réalisées sous Abaqus lors du projet ingénieur de L. Guénel et S. Pons (co-encadré avec S. Bourgeois, LMA/ECM).

Sur certaines anches en roseau, il est apparu que l'anche double devait être humidifiée pour que la caractéristique se rapproche d'une droite. Cela correspond à la pratique de la plupart des hautboïstes qui font tremper l'anche (environ 1mn) avant de jouer.

Effets visco-élastiques L'hystérèse présente en figure 2.4 (gauche) suggère l'existence de phénomènes visco-élastiques. Des analyses d'images réalisées lors d'expériences où la pression dans la bouche artificielle passe brutalement d'une pression permettant le plaquage de l'anche à la pression ambiante ont permis d'identifier deux temps de relaxation (modèle à noyau exponentiel, [Chr03]) : $\tau_1 = 2.5\text{ s}$ et $\tau_2 = 850\text{ s}$ (cf. figure 2.4, droite). Des résultats assez proches, donc, de ceux obtenus sur la clarinette par Dalmont et coll. ($\tau_1 \simeq 8\text{ s}$, $\tau_2 \simeq 900\text{ s}$, [DGO03]). Il s'agit donc bien d'effets quasi-statiques si on compare les temps caractéristiques de ces effets aux périodes des régimes étudiées (de l'ordre de 10^{-2} s) ou à l'inverse de la fréquence propre d'un anche double (de l'ordre de 10^{-3} s).

Pertinence du modèle d'écoulement classique

Caractéristique débit / chute de pression En reprenant les principes du travail réalisé par les collègues du Mans sur la clarinette [DGO03], nous avons pu mesurer pour la première fois la caractéristique non linéaire débit/chute de pression des instruments à anche double (hautbois, basson) [8]. Le dispositif expérimental est schématisé en figure 2.2 et un résultat typique présenté en figure 2.5 (gauche). Les flèches indiquent le sens de variation de la différence de pression lors

de l'expérience. L'hystérèse est d'autant plus marquée que les mesures sont faites avec des anches humidifiées (par trempage préalable) et en atmosphère saturée.

Il est intéressant de comparer les mesures effectuées pour des anches doubles aux mesures réalisées au Mans pour une anche (et bec) de clarinette (figure 2.5, à droite). Dans [DGO03], les auteurs concluent que la caractéristique non linéaire dans le cas de la clarinette est relativement bien décrite par le modèle théorique élémentaire (cf. annexe 7.1, figure 7.2) avec en particulier une courbe en cloche dont le maximum est situé au tiers de la différence de pression de plaquage. Dans le cas des anches doubles, on note que ce maximum est décalé vers la gauche et apparaît environ au quart de la différence de pression de plaquage pour le hautbois, au cinquième pour le basson. Ce résultat est important car il est en quelque sorte la signature d'un comportement significativement différent d'une anche double par rapport à une anche simple. De plus les caractéristiques non linéaires débit/chute de pression sont souvent utilisées comme brique élémentaire des modèles complets de fonctionnement des instruments. A noter également que l'hystérèse est bien moindre sur les mesures de clarinette, ce que nous supposons être dû au fait que l'anche de clarinette choisie est recouverte d'une pellicule en plastique (Plasticover®).

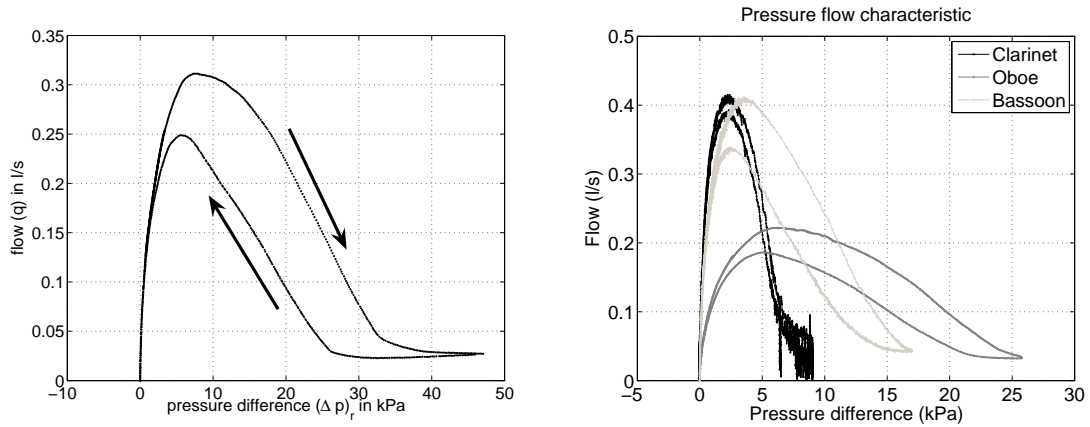


FIGURE 2.5 – Caractéristiques "débit / différence de pression" obtenues en quasi-statique. **Gauche** : résultat typique obtenu pour une anche de roseau (Glottin®) humidifiée et en atmosphère saturée. **Droite** : comparaison de différentes caractéristiques mesurées sur différents instruments. Les données relatives à la clarinette ont été obtenues par J.-P. Dalmont et al. [DGO03]. Figures extraites de [8].

Influence du diffuseur conique Sur la partie gauche de la figure 2.8, la confrontation des mesures avec le modèle classique utilisé pour les anches simples (annexe 7.1.2) révèle un écart. Cet écart traduit le décalage déjà évoqué du maximum de la courbe expérimentale vers la gauche. Nous avons cherché à expliquer cet écart en termes de récupération de pression.

Le long de l'anche et de la douille conique, l'énergie (au sens de la "charge" hydrodynamique) n'est pas conservée, en particulier parce que l'écoulement est turbulent. Nous l'avons vérifié en mesurant des profils de vitesse en sortie de diffuseur conique (figure 2.6) ou en faisant des visualisations Schlieren (figure 2.7). Mais à la différence de la clarinette où le brusque élargissement dans le bec provoque un mélange turbulent sans récupération de pression (principe bien expliqué

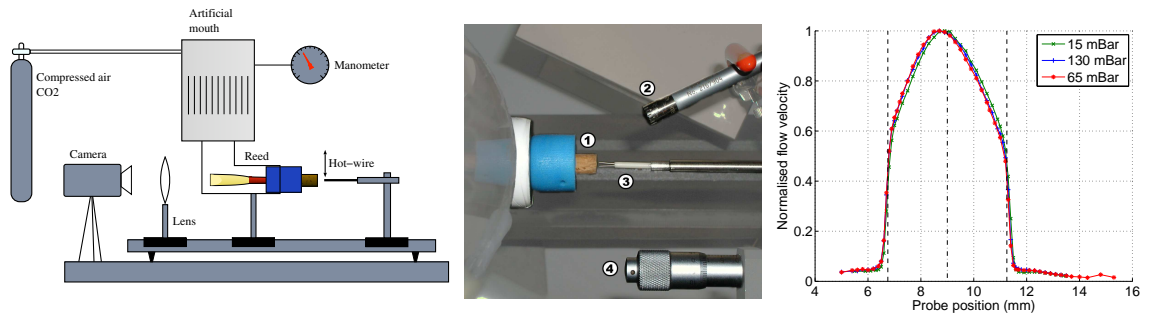


FIGURE 2.6 – **A gauche** : schéma de l'expérience de mesures de profils de vitesse (au fil chaud) en sortie d'anche double. **Au centre** : vue rapprochée de l'expérience (1 : sortie de l'anche double / 2 : microphone / 3 : sonde de vitesse à fil chaud / 4 : vis millimétrique pour le positionnement de la sonde.) **A droite** : exemple typique de profils de vitesse pour trois pressions dans la bouche (normalisés). Figure extraite de [Alm06].

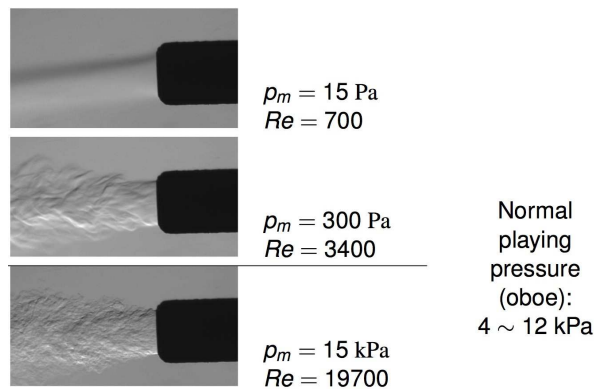


FIGURE 2.7 – Visualisation Schlieren (banc développé par B. Fabre) en sortie de la douille montrant un écoulement turbulent dans les cas correspondant au jeu normal. Figure extraite de [Alm06].

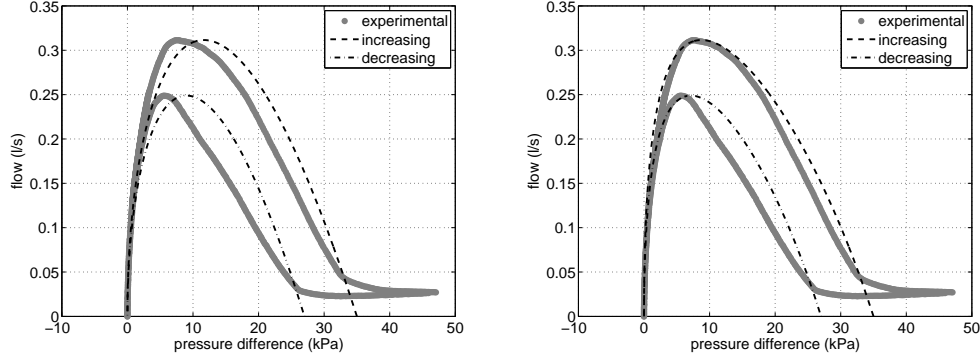


FIGURE 2.8 – Confrontation modèle/expérience. **Gauche** : le modèle est celui utilisé classiquement pour les anches simples (cf. annexe 7.1). L’hystérèse due à la visco-élasticité de l’anche n’est pas modélisée ici : deux valeurs distinctes pour les paramètres p_M et k_s sont ajustées pour les deux branches du cycle. **Droite** : valeurs des paramètres inchangées, mais modèle d’écoulement prenant en compte le rôle du diffuseur conique avec $C_p = 0.8$. Figures extraites de [8].

par Hirschberg, [Hir95]), les variations plus douces de profil interne jouent le rôle de diffuseur conique : le ralentissement de l’écoulement s’accompagne d’une récupération de pression. On peut alors chercher à décrire la pression récupérée par une formule phénoménologique [Aza96] :

$$\delta p_{rec} = \frac{1}{2} C_p \rho v_{in}^2 \quad (2.1)$$

où v_{in} est la vitesse de l’écoulement à l’entrée du diffuseur conique et C_p un coefficient semi-empirique qui dépend surtout des paramètres géométriques de la douille. Par comparaison avec des géométries comparables (en termes de rapport entre sections à l’entrée et à la sortie, et du rapport entre la longueur et le diamètre de l’entrée) étudiées dans la littérature pour des nombres de Reynolds comparables [Whi01, Aza96] nous avons estimé ce coefficient à :

$$0.7 \leq C_p \leq 0.8$$

La confrontation modèle/expérience est présentée sur la partie droite de la figure 2.8 avec $C_p = 0.8$.

Discussion

- **Ce modèle est-il un bon modèle ?** Si on regarde l’image de droite de la figure 2.8, on peut se satisfaire de l’accord global entre l’expérience et le modèle. La différence principale de comportement par rapport aux anches simples est bien identifiée. Attention cependant si on s’intéresse à ce modèle en vue de prédiction sur le seuil d’oscillation : les pentes sont alors déterminantes (cf. paragraphe 2.2.3) et comme on le voit, au-delà du maximum, elles peuvent être très différentes entre expérience et théorie ! La réponse à la question posée dépend donc du contexte ...
- **Les limites du modèle quasi-statique d’écoulement** ont également été pointées grâce à une analyse non dimensionnelle qui révèle des nombres de Strouhal beaucoup plus importants que dans le cas des anches simples ([6], [Alm06]). Cette analyse est confortée par des mesures

du profil de vitesse en sortie de la douille conique qui révèlent des motifs différents en dynamique ou en statique, c'est à dire lorsque l'anche est en auto-oscillation ou pas [Alm06].

- **Remarque sur la généralité des résultats :** les résultats présentés sur les anches doubles dépendent probablement dans une certaine mesure du type d'anche choisi. Ici, des anches en roseau déjà préparées (marque Glotin®) ont été choisies. L'avantage est de disposer d'un modèle d'anche qui ne nécessite pas de grattage. Cependant, reprendre les études présentées avec un corpus d'anche plus important permettrait d'évaluer la portée des résultats obtenus.

2.2.2 "Ouvrir la boucle" (de rétro-action) pour une caractérisation dynamique par forçage : l'exemple des instruments de type flûte

Collaborateurs : B. Fabre (LAM-IJLRD), P. de la Cuadra (Univ. Católica de Chile)

Dans certains cas, l'étude quasi-statique du système bouclé comme à la section précédente n'a pas de sens car le comportement de l'instrument en statique n'est pas le prolongement à très basse fréquence de celui observé aux fréquences de jeu. C'est le cas pour les instruments à jet oscillant² (flûtes, certains tuyaux d'orgue ...) pour lesquels la déflexion du jet de part et d'autre du biseau est initiée à la sortie du canal par la modulation de la vorticité dans les couches de cisaillement du jet par le champ acoustique [Fab08].

Pour étudier comment une perturbation acoustique est convectée et amplifiée le long du jet, on ouvre la boucle de rétro-action en enlevant le résonateur (le corps de l'instrument) et on travaille en forçage selon le schéma présenté en figure 2.9 : le jet est soumis à un champ acoustique transverse généré par deux haut-parleurs en opposition de phase.

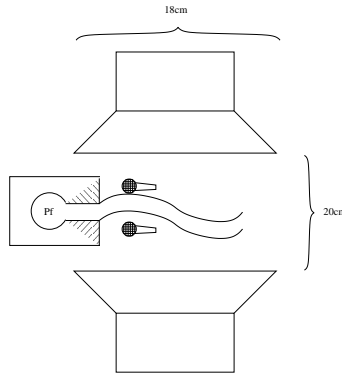


FIGURE 2.9 – Schéma de l'expérience montrant deux haut-parleurs générant une excitation acoustique transverse à la direction d'écoulement du jet d'air. Le couple de microphones est utilisé pour estimer la vitesse acoustique. Figure extraite de [10].

Pour les pressions d'alimentation les plus basses, le jet est laminaire et son instabilité est décrite habituellement en suivant l'approche de Rayleigh [Ray77, chap. XXI] sous les hypothèses simplificatrices d'un fluide bidimensionnel non visqueux. Ce modèle linéaire où les particularités

2. Pour cette classe d'instruments, l'excitateur est un jet d'air qui oscille autour d'un biseau droit (flûte à bec), ou en encoche (shakuhachi japonais ou quena andine). Le jet d'air peut être formé en sortie d'un canal taillé par le facteur (flûte à bec), ou formé par les lèvres de l'instrumentiste (flûte traversière). Le réservoir de pression est soit l'instrumentiste, soit une soufflerie (tuyau d'orgue). La production du son résulte du couplage entre un mode hydrodynamique instable du jet d'air et un mode acoustique du volume d'air contenu dans l'instrument.

géométriques du canal peuvent être prises en compte en injectant le profil de vitesse du jet adéquat [Ség00], est cependant limité aux petites déflexions du jet.

Mais pour beaucoup d'instruments comme la flûte traversière ou les flûtes utilisées pour la musique populaire, les forts niveaux sonores sont atteints au prix d'un débit d'air important. On peut estimer par exemple que pour une flûte traversière, le nombre de Reynolds³ peut atteindre 10000. Dans ces conditions, le jet devient rapidement turbulent après la sortie du canal⁴. Le développement d'instabilités induites par une perturbation acoustique transverse a certes été étudié pour de tels jets (par exemple par Bechert [Bec78, Bec88], Thwaites et Fletcher [TF80, TF82]). Des modèles semi-empiriques ont été proposés, mais un travail important de compréhension du couplage entre l'instabilité du jet et la perturbation acoustique doit encore être accompli.

Qu'il s'agisse d'un jet laminaire ou turbulent, l'approche expérimentale a souvent été favorisée pour recueillir des données qui sont ensuite utilisées pour calibrer des modèles [FH00]. Dans l'expérience schématisée en figure 2.9, nous avons visualisé les déplacements du jet par méthode de Schlieren (visualisation du gradient d'indice de réfraction, [Mer87, section 3.2.2 p134]). A partir des films réalisés sous éclairage stroboscopique (environ 50 images par période apparente), nous avons obtenu des résultats quantitatifs grâce à des algorithmes de traitement d'image spécifiquement développés [10]. Deux techniques différentes ont été confrontées (morphologie mathématique intra-image et corrélation temporelle inter-image) pour valider les résultats. A l'issue de cette étape intermédiaire, nous disposons pour chaque image d'une estimation de la ligne médiane du jet en fonction de la distance depuis la sortie du canal. En figure 2.10 on présente, à gauche, une ligne médiane pour une image donnée, et à droite la reconstruction de la dynamique de la ligne médiane au cours du temps. A partir de ces données, on peut identifier les paramètres principaux

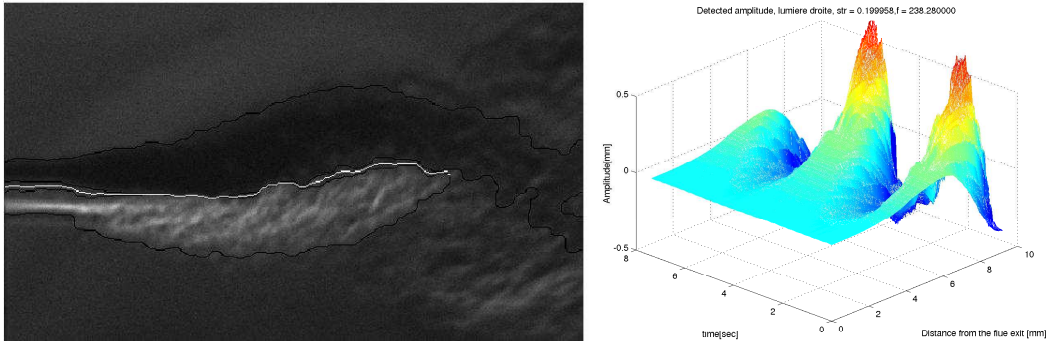


FIGURE 2.10 – **Gauche** : image originale obtenue par ombroscopie Schlieren sur le banc développé par B. Fabre (LAM-IJLRD), d'un jet faiblement turbulent soumis à un champ acoustique transverse auquel sont superposés les contours du jet (en noir) et la ligne médiane (en blanc) estimés par morphologie mathématique. **Droite** : La position médiane du jet oscillant est présentée en fonction du temps et de l'éloignement depuis la naissance du jet.

de modèles. Dans le cadre d'une description linéarisée du jet [Ray77, MC71], la perturbation est convectée le long du jet tout en étant amplifiée. La vitesse de convection est environ la moitié de la

3. $Re = U_j h / \nu$ où U_j est la vitesse du jet, h l'épaisseur du jet et ν la viscosité cinématique de l'air

4. Le son comprend alors une composante "soufflée" qui devient prépondérante. Selon les sensibilités esthétiques, ces sons font partie intégrante de la palette à maîtriser ou sont au contraire à proscrire. Par exemple, selon Robert Meylan [Mey74, p16] à propos de la quena : "La distance des lèvres au biseau oblige à souffler moins laminairement que sur les autres flûtes. Il en résulte un son foncé, mêlé d'un chuintement, qui laisse dans l'oreille une salure d'écueil asséché, une poussière d'épinards sauvages".

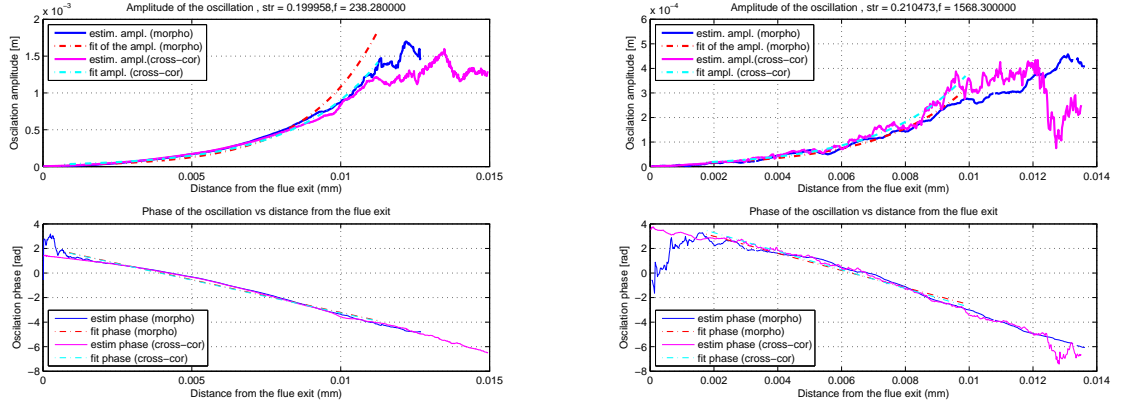


FIGURE 2.11 – Amplitude (haut) et phase (bas) du déplacement transverse du jet en utilisant la méthode par corrélation (ligne rose) et la méthode morphologique (ligne verte). Dans la colonne de gauche le jet est laminaire ($Re=500$, fréquence d'excitation de 238 Hz, i.e. $St=0.195$). Dans la colonne de droite, le jet est turbulent ($Re=3000$), fréquence d'excitation de 1568 Hz i.e. $St=0.21$). Figure extraite de [10].

vitesse d'écoulement du jet. Nous avons analysé les données expérimentales d'après cette théorie, c-à-d en supposant un déplacement transverse du jet η donné par [10, 54] :

$$\eta(x, t) = \Re \left(\eta_0 e^{\gamma x} e^{i\omega(t-x/c_p)} \right) \quad (2.2)$$

où η_0 représente l'amplitude initiale complexe de l'oscillation, γ le taux d'amplification spatiale, c_p la vitesse de convection et x la distance depuis la sortie du canal. Le taux d'amplification γ est estimé en ajustant une exponentielle à l'enveloppe de l'amplitude. La vitesse de convection de la perturbation c_p est estimée à partir de la pente de l'ajustement de la phase par une droite (voir figure 2.11).

Nous avons réalisé des visualisations/analyses d'images/estimations pour des nombres de Strouhal ($St = fh/U_j$) entre 0.05 et 1.15, pour des jets laminaires ($Re = 500$) ou turbulents ($Re = 3000$). Des différences de comportement entre jets laminaires et turbulents ont ainsi pu être mises en évidence : en particulier la vitesse de convection des perturbations le long du jet est significativement plus basse dans le cas turbulent ($c_p/U_j \approx 0.3$) que dans le cas laminaire ($c_p/U_j \approx 0.4$). Les résultats sont présentés en figure 2.12. Dans les deux cas, l'indépendance de c_p/U_j par rapport à

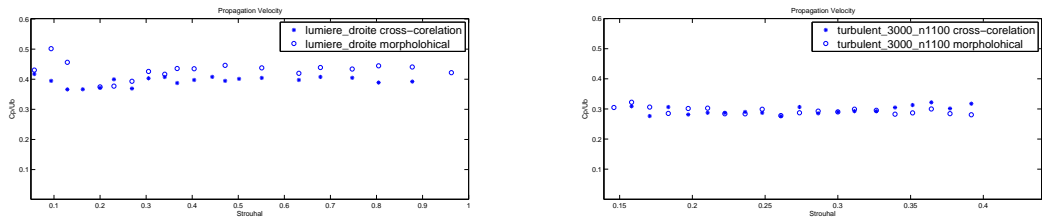


FIGURE 2.12 – La vitesse de convection des perturbations le long du jet c_p (adimensionnée par la vitesse du jet) est significativement plus basse en régime turbulent (à droite, $Re = 3000$) qu'en régime laminaire (à gauche, $Re = 500$).

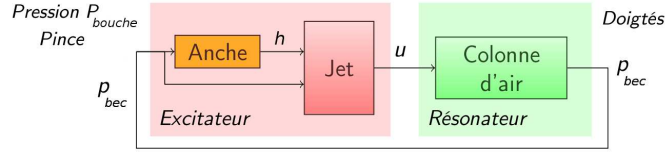


FIGURE 2.13 – Schéma fonctionnel de la clarinette en système bouclé excitateur/excité. Figure extraite de [64].

la fréquence d'excitation est assez remarquable. Ces résultats sont à comparer avec l'analyse de stabilité linéaire de Rayleigh pour laquelle $0.3 \leq c_p/U_j \leq 0.5$ suivant le profil de vitesse du jet. Les valeurs trouvées sont en accord avec les valeurs suggérées par d'autres auteurs [MC71, Nol98].

En ce qui concerne le paramètre η_0 , les données expérimentales disponibles ne nous ont pas pour l'instant permis d'aboutir à des estimations fiables. Le salut pourrait venir de travaux récents sur les modèles de réceptivité [Bla09].

Ces travaux ont également souligné la grande influence de la géométrie du canal d'anche sur les résultats [10], ce qui confirme les résultats de Segoufin et al. [SFdL04] et qui éclaire (un peu) l'attention portée par les facteurs à la réalisation de cette partie de l'instrument. Ce point sera approfondi au paragraphe 2.4.4.

2.2.3 Un exemple où les deux approches sont nécessaires : étude des seuils d'oscillation de la clarinette

Collaborateurs : D. Ferrand, F. Silva (thèse)

Dans le cas des instruments à anche, lorsqu'il s'agit de confronter les seuils d'oscillation expérimentaux à un modèle, l'analyse linéaire de stabilité du modèle fait apparaître le besoin de disposer de la caractéristique statique débit/différence de pression et de la fonction de transfert représentant la dynamique d'anche. On a donc besoin d'une approche à la fois en boucle ouverte (comme en 2.2.2) et en boucle fermée (comme en 2.2.1).

Ces études sont motivées par le fait que les confrontations de seuils (mesurés et prédits théoriquement) recensées dans la littérature donnent des écarts importants : Wilson & Beavers [WB74] pour les anches simples amorties obtiennent des écarts de 10% environ sur les fréquences de jeu, mais de 30% à 50% sur les pressions d'alimentation. Dans [11], nous avons montré pour la clarinette que la prise en compte dans les modèles, d'éléments qui n'étaient pas connus à l'époque de Wilson & Beavers (pertes visco-thermiques dans le résonateur, débit provoqué par le déplacement de l'anche) permettait de réduire les écarts en fréquence mais pas en pression d'alimentation (voir aussi le paragraphe 3.2.1). Il est remarquable que dans une étude comparable concernant les cordes vocales [RPvHaILAH07], les conclusions sont très similaires : en essayant d'estimer les paramètres du modèle de cordes vocales à une ou deux masses (avec rétro-action d'un guide d'onde aval), l'accord sur la fréquence est d'environ 10% (ce qui reste important puisque cela correspond à 114 cents, soit plus d'un demi-ton) mais des erreurs sur les pressions d'alimentation sont souvent de l'ordre de 50%. Pour les cuivres, avec des modèles similaires, les conclusions sont identiques [LHvH⁺06], en accord d'ailleurs avec les premiers résultats du genre obtenus par Cullen et al. [CGC00]. Dans un récent travail [64], nous avons montré que le fonctionnement de la clarinette

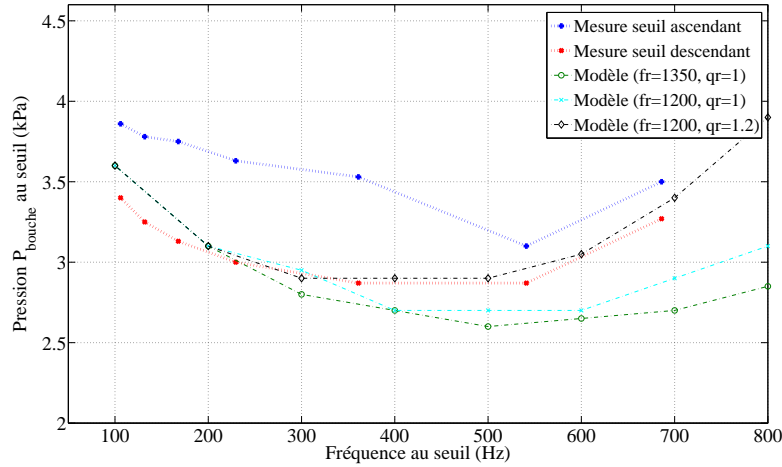


FIGURE 2.14 – Comparaison entre seuils donnés par l'expérience et le modèle, selon l'approche "boite noire" présentée dans [64]. Travaux en cours.

au seuil s'explique bien par un schéma bouclé exciteur/résonateur (figure 2.13) pour peu que les caractéristiques de chacun des blocs soient mesurées (approche boîte noire, critère de Barkhausen entre les blocs) : on atteint pour la configuration étudiée un accord de l'ordre du pour-cent en fréquence (12 cents) et d'environ cinq pour-cent en pression d'alimentation. Par contre, si on cherche à identifier les coefficients de modèles paramétriques, on retombe dans les mêmes biais entre seuils prédits et mesurés que ceux présentés dans la littérature. En particulier, on retient que :

- Le modèle classique (cf. annexe 7.1) donnant, en statique, le débit en fonction de la différence de pression et de l'ouverture du canal d'anche, n'est pas suffisamment précis et il faut utiliser des mesures de cette relation. Pour tenter d'améliorer les résultats de l'approche paramétrique, certains nouveaux raffinements pourraient être considérés : Stewart et Strong suggèrent que la raideur dépend de la longueur d'anche en contact avec le bec [SS80]. Cette idée est reprise par M. van Walstijn et al. qui montrent que si on considère un modèle mécanique 3D, et qu'on en tire des paramètres équivalents pour un modèle 1D, ces paramètres sont variables en fonction de l'ouverture : les caractéristiques débit/pression ainsi reproduites présentent des écarts par rapport au modèle classique similaires à ceux que nous observons expérimentalement [vW02, Fig. 10.24, p239], [vWA07].
- Le modèle d'anche à un degré de liberté, déterminé par fréquence de résonance et facteur de qualité n'est pas suffisant et il faut utiliser des mesures de la fonction de transfert entre l'ouverture et la différence de pression : en particulier, une chute du gain de l'ordre de 3dB mesurée aux basses fréquences, qui n'est pas prévue par ce modèle, s'est avérée déterminante pour réduire les écarts entre seuils mesurés et prédits [64].

Nous allons dans les mois à venir systématiser ces études pour des fréquences de jeu et paramètres différents afin d'évaluer la généralité des résultats obtenus (des premiers résultats encourageants sont présentés en figure 2.14). Ce type d'étude pose à nouveau la question de l'évaluation des modèles : qu'est-ce qu'un bon modèle ? A l'aune de quel indice faut-il établir sa valeur ? Le modèle

classique des instruments à anche est-il mauvais au vu des écarts observés pour les seuils d'oscillation avec l'expérience ? La réalité est plus complexe, et pour expliquer les écarts constatés il faut aussi considérer des difficultés expérimentales pour accéder à certains paramètres (presque tous en fait !) sans parler de la sensibilité du modèle pour certains paramètres. En d'autres termes, les barres d'erreur associées à ces résultats sont très importantes. Cette difficile question de l'évaluation d'un modèle sera abordée plusieurs fois dans le document, et dans des contextes parfois différents comme la synthèse sonore (chapitre 3).

2.3 Où s'arrête l'instrument, où commence l'instrumentiste ?

Mesure de paramètres de contrôle modifiés par les saxophonistes

Collaborateurs : Ph. Guillemain , D. Ferrand, A. Farcy (stage M2)

L'étude d'un instrument de musique seul ne suffit pas à expliquer les détails des sons produits. En effet, la production d'un son résulte d'un couplage complexe entre l'instrument et l'instrumentiste. Ce dernier, grâce à des années d'expérience, élabore des stratégies performantes du contrôle de l'instrument. Pour mieux appréhender ces stratégies dans le cas du saxophone, nous avons développé un dispositif expérimental qui permet de mesurer l'évolution de plusieurs paramètres modifiés simultanément par le saxophoniste (cf. figure 2.15). On ne s'intéresse pas aux doigtés, mais à des quantités évoluant continuellement : pression dans la bouche du musicien, dans le bec de l'instrument, et force d'appui de la lèvre sur l'anche. Au-delà de la modification des paramètres de contrôle, le rôle de l'instrumentiste est aussi de compléter l'instrument, en rallongeant la colonne d'air du résonateur en amont de l'anche.

L'étude détaillée est publiée [15] mais nous rappelons les principales conclusions.

Influence du conduit vocal Ce thème de recherche a souvent été abordé depuis des décennies [Bac85, BH85, CTH82, Fri05, SLdS08, TFH⁺05] avec des approches diverses : conjectures, mesures avec maquette d'instrument, ou sans production de son ... mais peu de mesures directes de l'effet du conduit vocal en cours de jeu, sans doute du fait des contraintes de non invasivité mises en jeu (c'est donc un exemple typique d'expérience *in vivo*). Notre objectif au contraire était de saisir l'évolution continue et en cours de jeu de l'influence du conduit vocal sur le son produit par l'instrument (ici un saxophone alto) à la manière de ce qui est fait dans [Wil96, SLdS08]. A partir de deux mesures de pression dans la bouche du musicien et dans le bec de l'instrument et grâce à des techniques d'analyse originales faisant appel au concept récent de masque de Gabor, nous avons pu accéder au rapport des impédances d'entrée vues depuis le bec, du conduit vocal et de l'instrument, échantillonné aux fréquences multiples de la fréquence de jeu. Il apparaît alors que le musicien expérimenté est capable de modifier la fréquence de la première résonance de son conduit vocal : pour réaliser des effets sonores particuliers comme les glissements en fréquence présentés en figure 2.15 (dans ce cas l'auto-oscillation résulte de la synchronisation avec cette fréquence de résonance) ou même lors d'un jeu standard (dans ce cas au contraire, le joueur parvient à minimiser l'influence de son conduit vocal sur une large bande de fréquence). Dans ce dernier cas,

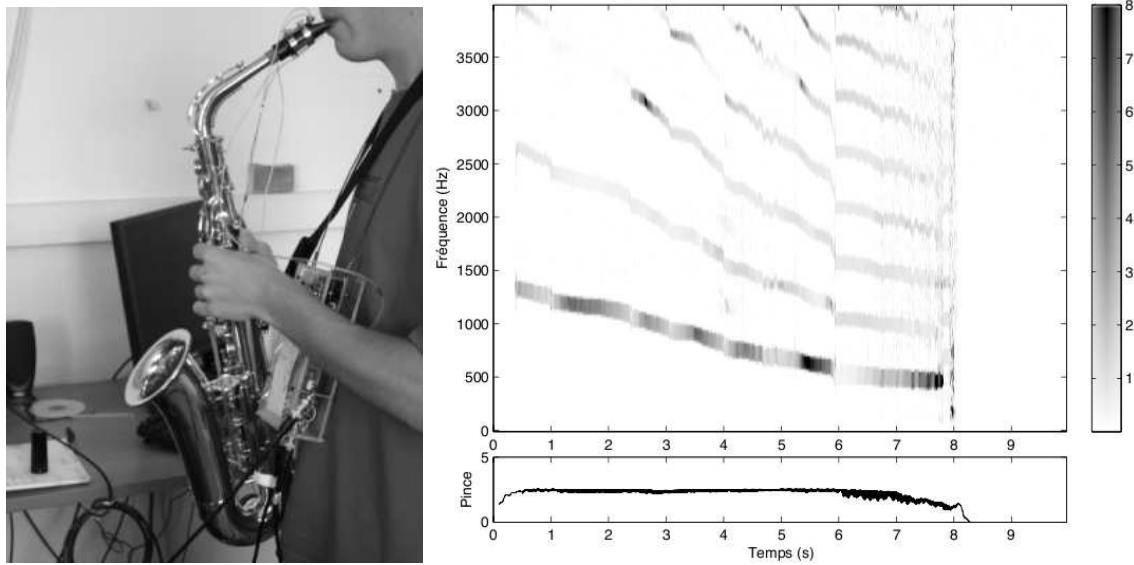


FIGURE 2.15 – **A gauche** : dispositif de mesure des gestes du saxophoniste constitué de plusieurs capteurs (un capteur de force sur l'anche, une sonde de pression dans le bec du saxophone, une autre dans la bouche) reliés à une carte électronique portée par le musicien en bandoulière. **A droite** : évolution dans le temps du rapport des impédances du conduit vocal et de l'instrument échantillonné aux multiples de la fréquence de jeu (en haut) et pince de l'anche (en bas) pour un glissando réalisé en maintenant le doigté constant (doigté F3).

l'objectif visé est semble-t-il d'obtenir une justesse, une facilité d'émission et une homogénéité de timbre sur toute la tessiture de l'instrument.

De plus, contrairement au discours des saxophonistes, la force d'appui de la lèvre sur l'anche est modifiée également au cours de l'effet, ou des transitoires d'attaque.

Contrôle temps réel de la "pince" En étudiant comment le saxophoniste opérait lors d'une montée chromatique dans les deux premiers registres en détachés (attaques à la langue), il est apparu que les résultats étaient typiques de celui présenté en figure 2.16 qui représente une des notes de la montée chromatique. L'attaque de la note se fait avec une pince très relâchée : en bas à gauche de la figure 2.16 la force de la lèvre sur l'anche délivrée par le capteur FSR est très faible. Une fois que l'auto-oscillation est initiée et jusqu'à $t = 200\text{ms}$, l'augmentation de la pince est rapide, par opposition à ce qui se passe après $t = 200\text{ms}$ où l'augmentation de la pince est à peine perceptible. Ce contrôle de la pince s'interprète en mettant en regard la fréquence instantanée (en haut à droite). La variation de fréquence est une fonction croissante de la pince. Ces données suggèrent qu'à l'attaque, le saxophoniste relâche sa pince (canal d'anche plus ouvert) afin d'obtenir la bonne note sur le bon registre (l'anche est encore plus relâchée à l'attaque pour les notes du premier registre). En effet, l'analyse linéaire de stabilité révèle que pour des fortes pinces, le seuil d'oscillation correspond au second registre [14]. Il est d'ailleurs bien connu des saxophonistes que l'attaque d'une note sur le premier registre ne s'obtient qu'avec une pince relâchée. Une fois la note sélectionnée, le saxophoniste réalise un ajustement de la fréquence (assez important jusqu'à $t = 200\text{ms}$, plus fin ensuite).

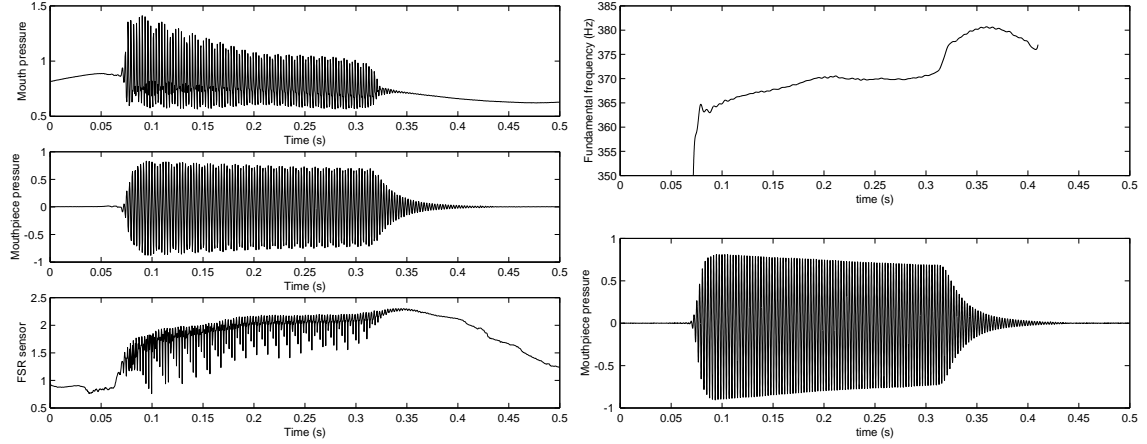


FIGURE 2.16 – **A gauche** : zoom sur une attaque (second registre, signaux temporels). **A droite** : mêmes données, dont on extrait la fréquence instantanée (présentée avec la pression externe). Figures extraites de [15].

D’une note à l’autre (montée chromatique) on observe une augmentation progressive de la force de la lèvre sur l’anche. Dans le second registre, la valeur moyenne importante de la pince permet sans doute d’éviter de retomber sur le premier registre. Ici encore, le résultat est surprenant pour les saxophonistes qui se sont prêtés à l’expérience, persuadés de maintenir une pince constante d’une note à l’autre.

A la fin de la note, la langue obture le canal d’anche et on observe la décroissance exponentielle des ondes dans le résonateur, tandis que la fréquence instantanée augmente : dans un instrument à anche simple, la fréquence de jeu au seuil est inférieure à la fréquence de résonance du mode acoustique correspondant.

Dans le même esprit, nous menons actuellement une étude sur la caractérisation de l’influence du geste du musicien dans le jeu de la flûte à bec (stage S. Terrien, collaboration D. Ferrand et B. Fabre).

2.4 Nouvelle plateforme expérimentale : bouche artificielle asservie en pression

Collaborateurs : Didier Ferrand

2.4.1 Motivations

Depuis quelques décennies, l’utilisation de bouches artificielles en acoustique musicale s’est généralisée. Les premiers specimens ([MG41] en 1941, [Bac61] en 1961) sont destinés à l’étude des instruments à anche simple (la clarinette en particulier), tandis que les bouches artificielles pour cuivre sont apparues plus récemment ([GP97], [30]). Les bouches développées n’ont pas pour but le mimétisme avec le jeu d’un instrument par un musicien (à la différence des robots musiciens japonais [SCS⁺06]) mais sont conçues pour contrôler les paramètres physiques pour l’étude systématique de la physique de l’instrument. Ces dispositifs expérimentaux ont déjà permis

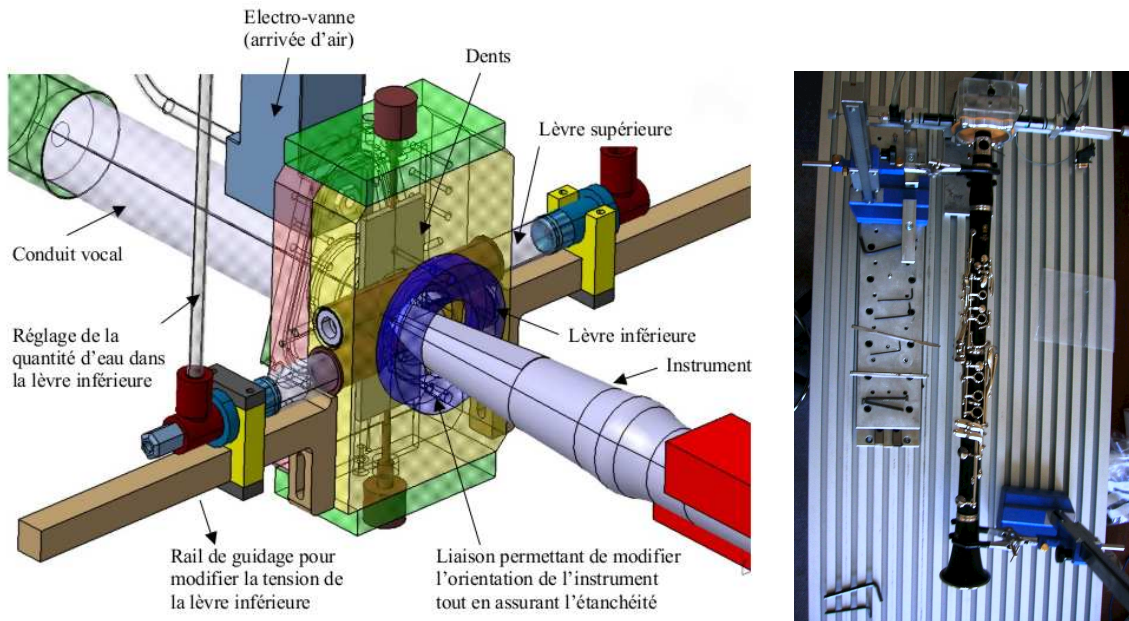


FIGURE 2.17 – **A gauche** : schéma de la bouche artificielle MIAM-v2 (vue Catia 3D, S. Devic). L'interface entre l'instrument à vent et l'électrovanne, constituée des lèvres, est un élément primordial pour pouvoir faire jouer l'instrument. Ici chaque lèvre est une enveloppe cylindrique de latex remplie d'eau; tension et volume d'eau sont ajustables. Ce dispositif a été conçu pour pouvoir jouer des instruments à anche, des cuivres et des flûtes à bec. **A droite** : MIAM-v2 et clarinette.

de nombreuses avancées dans la compréhension du fonctionnement des instruments à vent (ou d'ailleurs pour l'étude des cordes vocales avec des montages similaires, [VXA⁺03]). Leur qualité essentielle est de permettre la production d'une auto-oscillation sans avoir recours à un musicien : les paramètres de contrôle peuvent être réglés indépendamment, et les réglages maintenus aussi longtemps que nécessaires pour la mesure.

Mais leur principale qualité, qui est de figer les paramètres de contrôle de l'instrument, est également source de limitations. Nous proposons de lever ces restrictions tout en conservant la maîtrise des paramètres de contrôle grâce à des actionneurs asservis. Dans le cadre du projet ANR CONSONNES, l'un des quatre axes du projet était consacré à la conception d'une bouche artificielle robotisée. Partant de deux bases similaires (MIAM, Multi Instrument Artificial Mouth, cf. figure 2.17), l'une à l'Ircam, l'autre au LMA, nous avons dans chaque laboratoire exploré différentes facettes de ce projet. Au LMA, nous nous sommes concentrés sur l'asservissement en pression d'alimentation de la bouche artificielle, avec comme objectifs la régulation quasi-statique (pour la mesure de diagrammes de bifurcations expérimentaux), la reproduction d'évolutions temporelles académiques (pour la comparaison avec la réponse de modèles numériques), et l'asservissement à partir d'évolutions de pression mesurées dans les bouches d'instrumentistes.

Je souligne l'importance pour un tel projet du support de l'atelier mécanique du LMA : Alain Busso, et Stephan Devic surtout, mais aussi au départ Alain Cosquer et Jean-Philippe Logier.

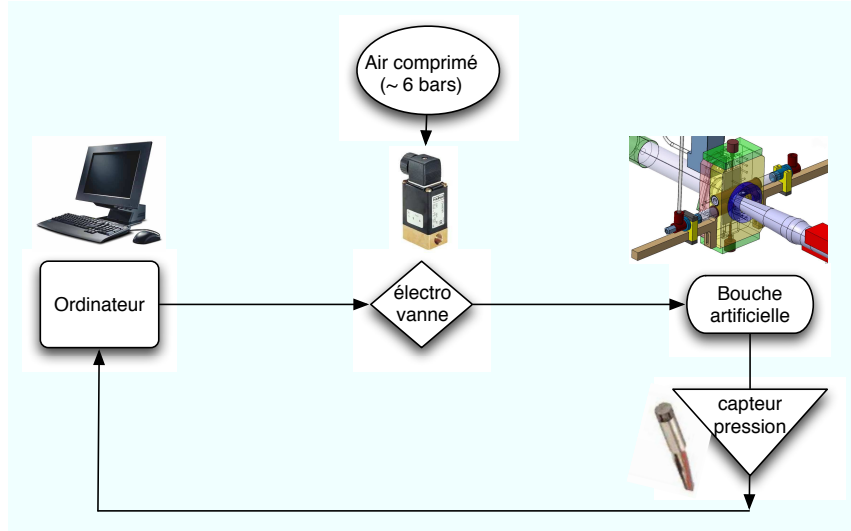


FIGURE 2.18 – Schéma de principe de la bouche artificielle asservie en pression. Un algorithme correcteur implanté sur une carte DSP modifie l'ouverture de l'électrovanne (toutes les 40 micro-secondes) de façon à minimiser l'écart entre consigne et information délivrée par le capteur.

2.4.2 Principe de la régulation de pression

Schéma en boucle fermée : nous utilisons des techniques standards de l'automatique. Une boucle de contrôle est formée (figure 2.18) en associant : (1) un capteur qui mesure la valeur de la variable à contrôler (ici p_{bouche}), (2) un système dit "correcteur", c'est-à-dire un algorithme qui en fonction de l'écart entre mesure et consigne génère une commande adaptée, et (3) un actionneur (ici une électrovanne), organe piloté par la commande qui agit directement ou indirectement sur la variable à contrôler.

Matériel : en pratique, les algorithmes sont développés en Matlab/Simulink puis compilés et téléchargés sur une carte dSpace pour l'exécution temps réel. L'actionneur est une électrovanne proportionnelle à commande directe (ouverture proportionnelle au débit). Initialement pilotée en tension par un générateur de PWM (signaux carrés dont on contrôle le rapport cyclique) proposé avec l'électrovanne, cette solution a été abandonnée. En effet, les signaux PWM étant à des fréquences et des niveaux audibles, ils sont incompatibles avec des mesures acoustiques. La solution alternative suivante a été mise en place : l'électrovanne est alimentée en courant continu, ce qui a nécessité la fabrication d'une carte électronique qui joue le rôle d'étage de puissance entre les signaux délivrés par la carte dSpace et l'entrée de l'électrovanne.

Correcteur typique (PID) : la commande électrique $i(t)$ envoyée à l'électrovanne est déterminée en fonction de l'erreur $e(t)$ entre la mesure et la consigne :

$$i(t) = k_p e(t) + k_d \dot{e}(t) + k_i \int e(t), \quad (2.3)$$

où k_p (resp. k_d , k_i) sont les gains proportionnel (resp. dérivée, intégral) à ajuster en fonction des performances souhaitées et des contraintes de stabilité.

2.4.3 Difficultés et stratégies de contrôle développées

Compromis performance/robustesse Une modélisation du procédé (équations régissant le fonctionnement de l'électrovanne proportionnelle ainsi que des écoulements d'air dans le système bouche artificielle couplée à un instrument ou une cavité de test) a été effectuée dans le but de choisir la meilleure stratégie de contrôle, et ceci pour deux types d'instruments : flûte à bec et clarinette. Une analyse de stabilité du système en boucle fermée, incluant une analyse au premier harmonique du comportement non linéaire de l'électrovanne a été réalisée [61]. Cette analyse permet de mettre en évidence que l'augmentation des performances du correcteur (augmentation de sa bande passante) finit invariablement par provoquer une instabilité de la boucle de contrôle, comme toujours pour les systèmes asservis. Il faut donc trouver le juste compromis entre performance et robustesse. Ce compromis, comme expliqué ci-dessous, dépend d'une part de l'instrument considéré, d'autre part du type d'application envisagée.

Différentiation selon le type d'instrument Parvenir à contrôler la pression est plus ou moins difficile selon le type d'instrument : l'actionneur étant une électrovanne en débit et la grandeur à asservir une pression, un instrument est au premier ordre, pour le système de contrôle, une fonction de transfert pression/débit entrant. L'instrument est alors assimilable à une résistance à l'écoulement.

Dans le cas de la flûte, le contrôle est plus aisé dans le sens où les lois de débit à injecter pour obtenir la bonne pression sont non linéaires, mais douces et monotones. Au contraire, dans le cas de la clarinette, la caractéristique débit/pression présente une forte non-linéarité non monotone, rendant le système beaucoup plus difficile à piloter. Enfin, une autre difficulté mise en évidence dans l'étude du contrôle de la clarinette est l'apparition d'une perturbation en débit particulièrement marquée au seuil d'oscillation. Cette perturbation sur la pression dans la bouche a été compensée par l'ajout d'un volume important (120 l) en amont de l'instrument.

Différentiation selon le type d'application De même, le contrôle est adapté et optimisé selon le type d'application. Pour une régulation de pression statique, le seul défi est de compenser les fluctuations du réseau d'air, et un régulateur simple de type PI peut suffire. Une bande passante élevée du système n'est pas nécessaire et par conséquent les risques d'instabilité sont moindres. Au contraire, à supposer un réseau d'air naturellement stable, une bande passante faible aura l'avantage de filtrer le bruit inhérent au capteur de pression. A titre d'illustration, nous parvenons pour une clarinette à des erreurs de l'ordre du Pascal pour des consignes (quasi-statiques) qui peuvent atteindre plusieurs kilo-Pascal. En revanche, un asservissement pour produire des transitoires (cas de reproduction d'un transitoire d'attaque) est très demandeur en terme de dynamique au niveau de l'actionneur, et l'asservissement doit être de bande passante élevée avec le risque d'instabilité du système [61] lorsqu'on se rapproche de la fréquence de coupure de l'électrovanne (250Hz). Dans ce cas, nous basons notre stratégie d'asservissement sur les techniques de contrôle répétitif par apprentissage (cf. ci-dessous).

Mise en pratique de l'asservissement : un panorama des différents types d'utilisation

Rampes lentes de p_{bouche} pour la flûte à bec : une utilisation possible de la régulation en

pression est l'exploration des différents régimes de l'instrument en appliquant une rampe contrôlée. La flûte présente une résistance à l'écoulement (caractéristique pression/débit) non linéaire mais monotone et de variation lente (sauf à faible débit) permettant l'utilisation d'un simple régulateur PI auquel on a adjoint un gain adaptatif pour ajuster les coefficients k_p et k_i en fonction du point de fonctionnement estimé en temps réel [16]. Le spectrogramme en figure 2.19 montre le résultat pour une rampe en p_{bouche} allant de très faibles valeurs (quelques dizaines de Pa) jusqu'à 3kPa. Plusieurs éléments sont visibles : les bifurcations, très localisées, marquent les changements de régime (seuil d'oscillation en bif. 1, changements de notes en bif. 2,3,4,5, et seuil d'extinction en bif. 6) et des changements de timbre qui se manifestent par la modification progressive de la répartition de l'énergie suivant l'axe des fréquences.

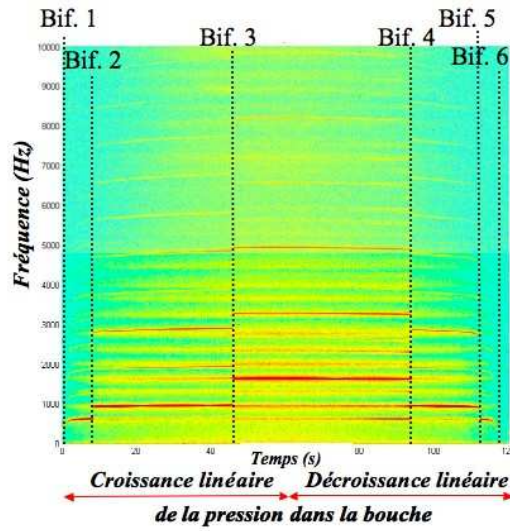


FIGURE 2.19 – Sonogramme de flûte a bec obtenu par une rampe en pression d'alimentation - doigté Bb sur une flûte alto Zen-On Bressan - collab. B. Fabre et F. Blanc, extrait de [16].

Cette expérience a aussi révélé la présence de sons éoliens dans une plage de pression autour de 50Pa (travail en collaboration avec B. Fabre et F. Blanc, [16]). Les régimes éoliens correspondent à la synchronisation d'un mode hydrodynamique du jet de rang élevé avec un mode acoustique du résonateur [Col68] et sont donc caractérisés par de faibles valeurs de l'inverse du nombre de Strouhal $St^{-1} = U_j/fW$. De tels régimes sont utilisés musicalement sur la flûte traversière, et fréquents sur les tuyaux d'orgue (perçus lorsque la pression d'alimentation décroît lentement, [BF65], [Bou29b]) mais leur existence sur les instruments de type flûte à bec était jusqu'à ce jour contestée, sur la base d'arguments géométriques (proximité trop importante entre la lumière et le biseau). A notre connaissance, leur existence n'avait jusque-là jamais été démontrée, leur observation nécessitant en effet une maîtrise importante des conditions expérimentales probablement inaccessible sans l'utilisation de la bouche artificielle asservie.

Rampes lentes de p_{bouche} pour la clarinette : une première application pour la clarinette est l'obtention de diagrammes de bifurcations où la consigne de pression est une rampe lente de 0 à 5kPa pour atteindre le plaquage de l'anche. Les résultats présentés en figure 2.20 seront discutés

au paragraphe 2.4.5 et au chapitre 4.

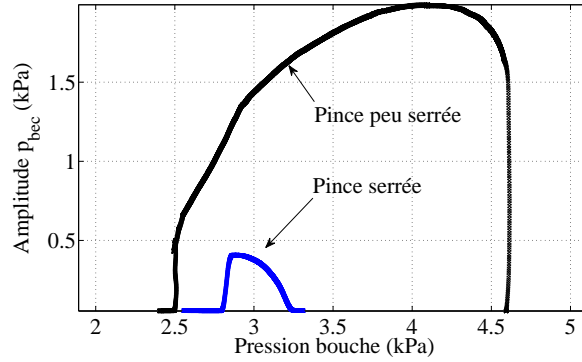


FIGURE 2.20 – Clarinette : diagrammes de bifurcations pour deux pinces différentes. Extrait de [66].

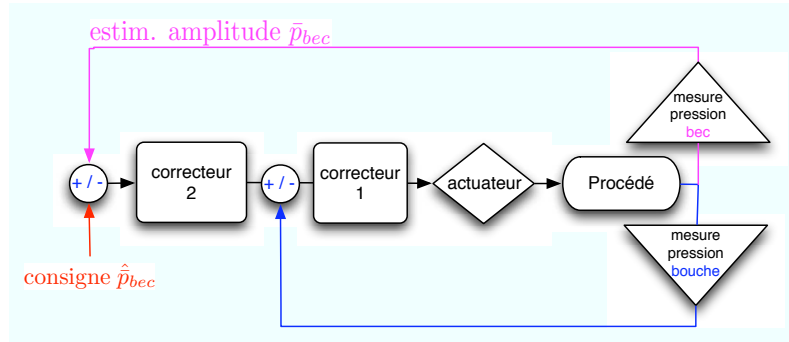


FIGURE 2.21 – Schéma de principe de la boucle cascade mise en place pour mesurer avec plus de précision les seuils d'oscillation. La consigne de la boucle interne (asservissement de la pression dans la bouche) est fournie par la sortie de la boucle externe qui cherche à asservir l'amplitude du signal de pression acoustique dans le bec. Extrait de [66].

Asservissement lent en p_{bec} pour la clarinette : dans le cas où la régulation nécessite le contrôle de la note émise elle même (plutôt que la pression dans la bouche), par exemple pour précisément étudier une bifurcation de Hopf, nous avons utilisé une boucle cascade (cf. figure 2.21) à partir de l'écart par rapport à une consigne donnée sur l'amplitude de la pression dans le bec. Cette approche a été mise à profit dans [64] pour mesurer aussi précisément que possible des seuils d'oscillation. Une illustration est donnée en figure 2.22. Ici encore, l'apport de la bouche artificielle asservie est manifeste par rapport aux tentatives antérieures de mesures de seuils d'oscillation au sens où on peut approcher expérimentalement le voisinage de la bifurcation.

Reproduction de transitoires rapides en p_{bouche} pour la flûte à bec : bien adaptée à la régulation en pression avec des signaux de type "rampe lente" destinés à mesurer les seuils de bifurcations, l'utilisation d'un PID avec gain adaptatif trouve ses limites dans le cas de la reproduction d'attaques où le signal de pression doit pouvoir suivre des trajectoires avec des variations correspondant à des constantes de temps de l'ordre de 5 à 10 ms. Dans ce cas, une stratégie de

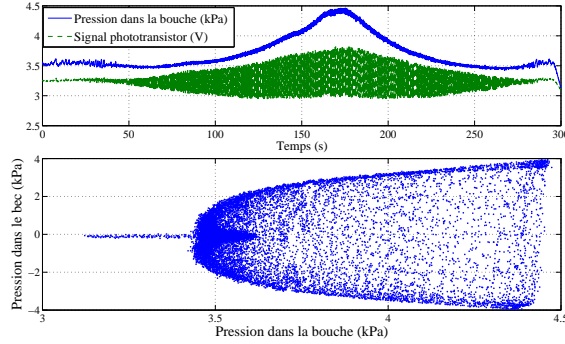


FIGURE 2.22 – Bifurcation en réglant sur l’amplitude de la pression dans le bec. Extrait de [66].

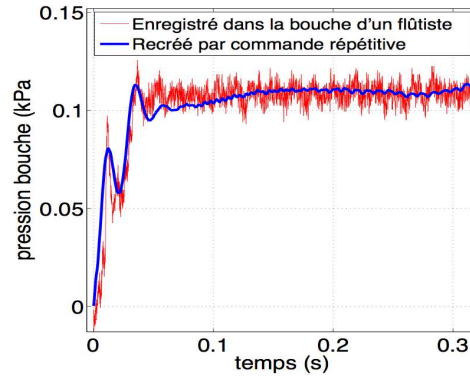


FIGURE 2.23 – Flûte à bec : attaque en pression reproduite par commande répétitive (en rouge), comparée à une mesure sur musicien (en bleu, fournie par B. Fabre). L’épaisseur du trait rouge révèle la présence d’un bruit aérodynamique plus important dans la bouche artificielle que dans celle du musicien, caractéristique que nous cherchons à corriger. Extrait de [66].

contrôle reposant sur les techniques de contrôle répétitif par apprentissage a été testée [SYTM88] pour progressivement annuler les erreurs de trajectoire dont l’occurrence est rendue répétitive. Des résultats de simulations très satisfaisants n’ont été que partiellement confirmés par des expériences sur la bouche artificielle. En effet, si au niveau théorique le processus d’apprentissage s’appuie sur le principe d’inversion de la fonction de transfert du procédé (instrument) pour envoyer une commande optimale trouvée après un processus d’itération, la convergence doit s’appuyer sur un procédé parfaitement reproductible. Le domaine où le comportement est le moins reproductible est le frottement sec de l’électrovanne proportionnelle. Par conséquent, un effort particulier a été mené avec succès pour limiter ces effets par l’étude des techniques de compensation de frottement et par l’application concrète d’un signal vibratoire optimal (dithering signal) destiné à linéariser le comportement à hystérèse du frottement [16]. L’inconvénient est l’introduction d’un signal de l’ordre de 250Hz dans le signal de pression pouvant éventuellement perturber le signal de pression émis par l’instrument lui-même. Dans le but d’éviter cette perturbation, nous allons explorer d’autres voies, par adjonction d’une boucle interne cascade avec mesure de vitesse ou d’accélération. Une illustration est présentée en figure 2.23.

Reproduction de transitoires rapides en p_{bouche} pour la clarinette : dans ce domaine, les

résultats sont préliminaires. La restitution d'attaque se fait par commande répétitive également, mais nous sommes limités par la dynamique de l'actionneur. Il faudrait pour améliorer ces performances un dispositif assurant la fonction d'une langue (ex : servovalve tout ou rien libérant subitement une pression pré-établie par la régulation amont dans la bouche). La figure 2.24 montre une attaque avec temps de montée de la pression dans la bouche de l'ordre de 35ms. Cette possibilité de la bouche artificielle a été utilisée par des collègues de l'équipe et comparée à un transitoire d'attaque en synthèse sonore [BGKMY10].

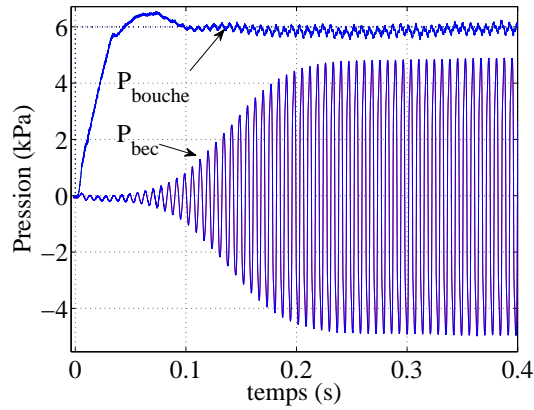


FIGURE 2.24 – Transitoire d'attaque sur une clarinette obtenu par commande répétitive. Extrait de [66].

Nous développons dans les sections 2.4.4 et 2.4.5 deux illustrations de travaux où l'apport de l'asservissement s'est avéré décisif. Il s'agit de mettre en lumière l'influence du travail du facteur d'instrument (2.4.4) ou du contrôle, exercé habituellement par le musicien (2.4.5).

2.4.4 Caractériser l'influence du travail du facteur (ex. flûte à bec)

Collaborateurs : B. Fabre (LAM-IJLRD), F. Blanc (thésard LAM-IJLRD) V. François (stage LAM-IJLRD), D. Ferrand.

Les facteurs de flûte à bec (en particulier B. Reinhard et P. Bolton avec qui nous avons eu des échanges) insistent sur l'importance de la géométrie du canal dans la flûte, en particulier les

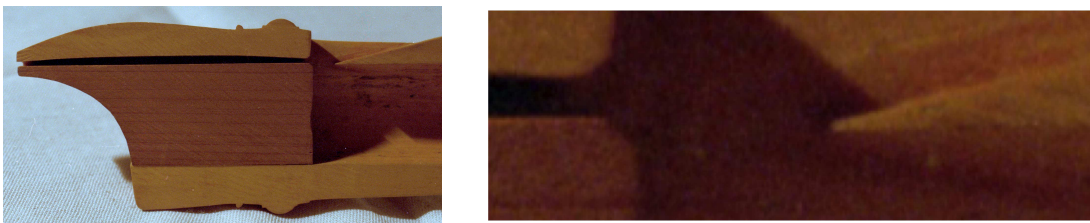


FIGURE 2.25 – Coupe d'une flûte à bec (à gauche) et zoom sur les chanfreins (à droite). Photo fournie par B. Fabre.

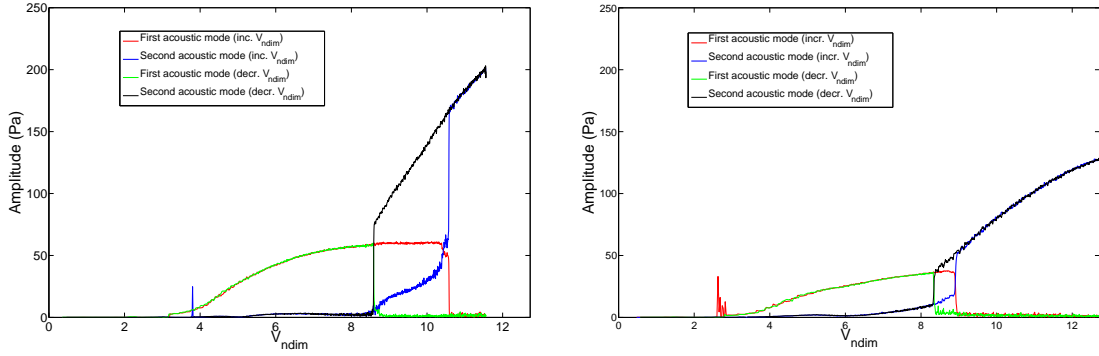


FIGURE 2.26 – Transitions entre les deux premiers registres lorsque la pression d’alimentation est asservie sur une consigne augmentant puis diminuant linéairement en 120s (flûte Zen-On Bressan, doigté sol grave). **A gauche** : géométrie d’origine du canal et des chanfreins. **A droite** : géométrie modifiée, canal droit sans chanfreins. Figures extraites de [16].

chanfreins en sortie du canal (figure 2.25). Peut-on mettre en évidence et caractériser leur influence en laboratoire ?

Pour tenter de répondre à cette question, nous avons comparé le comportement de flûtes à bec aux géométries de canal modifiées. Plus précisément, en utilisant les principes présentés au paragraphe 2.4.3, chaque flûte a été insérée dans la bouche artificielle asservie et soumise à des rampes lentes régulées en p_{bouche} (pression linéairement croissante puis décroissante, le tout en 120s) mettant en évidence différentes bifurcations qui correspondent au passage d’un registre à l’autre (un résultat est montré en figure 2.26).

La détermination précise des transitions entre les régimes (i.e. seuils de bifurcation) est une difficulté récurrente dans les expériences sur bouche artificielle. En effet, les fluctuations de la pression d’alimentation p_{bouche} ne peuvent être évitées sans le recours à un schéma en boucle fermée comme celui que nous avons adopté. La transition entre deux registres a été discutée par Gibiat [Gib88], qui suggère l’existence d’une gamme de pression d’alimentation pour laquelle deux régimes oscillant peuvent co-exister, formant une oscillation bi-périodique, ou même chaotique. Le diagramme présenté en figure 2.26 montre la transition entre les deux premiers registres dans le cas de la flûte alto Zen-On ”Bressan”, pour un doigté de sol grave (G4, 392Hz). Pour les plus basses valeurs de p_{bouche} l’instrument joue sur son premier registre (auto-oscillation synchronisée sur le premier mode acoustique du résonateur), puis passe sur le second registre, c’est à dire à l’octave (verrouillage sur le second mode acoustique du résonateur). On représente l’évolution de deux composantes fréquentielles de la pression interne (à relier aux fréquences de résonance des deux premiers modes). Leur amplitude est tracée en fonction de la vitesse de jet adimensionnée $V_{ndim} = U_j / f_1 W$, où U_j est la vitesse de jet estimée à partir de la pression p_{bouche} mesurée et du théorème de Bernoulli, f_1 est la fréquence de résonance du premier mode du tuyau, et W la distance entre la lumière et le biseau.

Pour la géométrie d’origine (figure 2.26, gauche) nous détectons facilement une transition entre les deux régimes vers $V_{ndim} \simeq 10.6$ lorsque p_{bouche} augmente : l’amplitude de la première composante fréquentielle chute brusquement, alors que l’amplitude de la seconde augmente. Dans la phase ”retour” où p_{bouche} décroît, la transition du second vers le premier registre a lieu lorsque

$V_{ndim} \simeq 8.6$. Grâce au caractère très régulier de la variation de p_{bouche} atteint par l’asservissement, la transition entre régimes apparaît clairement et permet de réfuter dans ce cas l’existence de régime bi-périodique ou chaotique. Sur la partie droite de la figure 2.26, on présente le résultat de la même expérience lorsque la géométrie du canal est modifiée (canal droit, pas de chanfreins). Les transitions ont lieu pour $V_{ndim} \simeq 8.9$ (au lieu de 10.6) lorsque p_{bouche} croît et $V_{ndim} \simeq 8.4$ (au lieu de 8.6) lorsque p_{bouche} décroît.

On mesure ici l’importance du travail du facteur et son apport en termes de possibilités offertes au musicien : avec la géométrie originale, l’instrument peut jouer plus fort sur les deux registres (ce qui est un critère important pour la flûte à bec), et la transition entre régimes est plus sûre puisque la largeur de l’hystérèse est plus importante (meilleur confort de jeu). A noter que les ”perturbations” sur les deux images aux faibles vitesses adimensionnées (V_{ndim} entre 3 et 4) correspondent aux sons éoliens évoqués au paragraphe 2.4.3.

Des analyses similaires sur d’autres doigtés, avec d’autres types de modifications géométriques ou même d’autres types de consignes en p_{bouche} sont disponibles dans les rapports de thèse de F. Blanc [Bla09, chap. 6] ou de stage de V. François [Fra08].

2.4.5 Caractériser l’influence des paramètres de contrôle (ex. clarinette)

Dans leur article [DGKO05], Dalmont et al. mettent en évidence analytiquement à partir du modèle de clarinette simplifié (dit de Raman, annexe 7.1.4) qu’en fonction de la valeur d’un paramètre adimensionnel β_1 , qualifié d’admittance adimensionnée à la fréquence de jeu [DGKO05, eq. (17) page 3297], la clarinette présente deux comportements qualitativement différents : aux fortes pressions dans la bouche le son s’éteint soit brutalement (faibles valeurs de β_1) soit progressivement (fortes valeurs de β_1). Grâce à l’utilisation de la bouche artificielle asservie, nous avons pu retrouver des comportements similaires sur une clarinette réelle, comme le montre la figure 2.27. Pour deux valeurs différentes de l’ouverture au repos du canal d’anche (paramètre permettant de modifier β_1), les deux comportements types prévus théoriquement par Dalmont et al. peuvent être clairement identifiés. Des diagrammes de bifurcation de clarinette ont déjà été mesurés à l’Université du Maine par Dalmont et Frappé [DF07, Fig. 5], mais l’intérêt d’un asservissement est de garantir des conditions expérimentales plus proches de celles sous-jacentes à l’établissement du diagramme de bifurcation du modèle (hypothèse quasi-statique) : les résultats expérimentaux présentent moins de ”perturbations” et sont plus directement comparables aux résultats analytiques ou numériques. De plus, la localisation des bifurcations est plus précise.

Loin de n’être que des curiosités de laboratoire, ces comportements différents sont exploités par certains clarinettistes : P.A. Taillard par exemple, pour jouer des notes à faible niveau (*pianissimo*) se place près de l’extinction avec une anche fortement pincée (ligne du haut, figure 2.27). Selon lui, cela lui permet d’obtenir, à niveau sonore égal, des timbres plus riches que s’il se plaçait près de la bifurcation de Hopf (à gauche du diagramme de bifurcation, aux faibles p_{bouche}). Où comment des considérations sur des bifurcations permettent d’expliquer pourquoi et comment un musicien souffle plus fort pour jouer moins fort ... Nous montrerons au chapitre 4 comment obtenir numériquement grâce à l’utilisation de la Méthode Asymptotique Numérique (MAN, continuation d’orbites périodiques) les diagrammes obtenus sur la gauche de la figure 2.27.

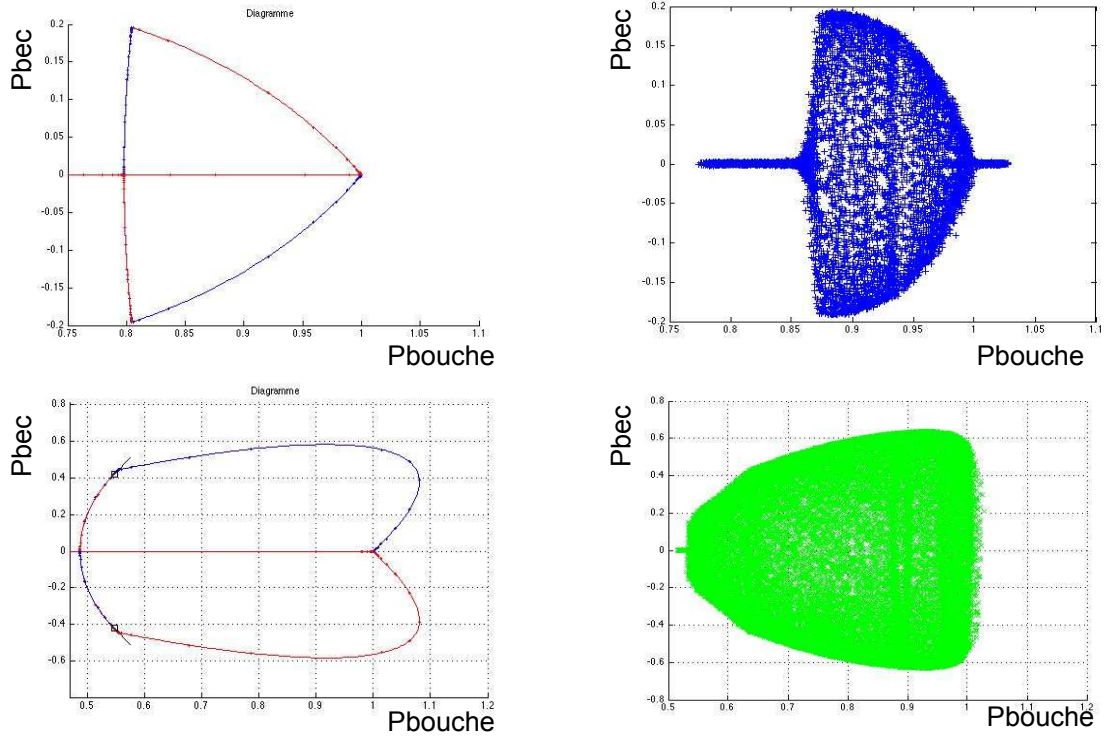


FIGURE 2.27 – Diagrammes de bifurcation de la clarinette : à gauche, modèle de Raman (détails au §4.4.3), à droite, bouche artificielle asservie. Deux comportements différents en fonction de l’ouverture au repos de l’anche : faible en haut (anche pincée) importante en bas (pince lâche).

2.5 Perspectives

En plus des prolongements naturels de certains sujets évoqués dans les paragraphes précédents, quelques perspectives sont évoquées dans ce paragraphe. L’ordre dans lequel elles sont présentées correspond au terme que j’envisage pour chacune d’entre elles.

La bouche artificielle est-elle un bon instrumentiste ? cas de la flûte à bec (coll. B. Fabre et D. Ferrand) : Au sein de la famille des flûtes, le partage des différents paramètres de contrôle entre facteur et instrumentiste varie fortement. Pour une flûte à bec, la géométrie de l’excitateur est déterminée par le facteur, et l’évolution temporelle de la pression dans la bouche contient l’essentiel de l’information de contrôle et d’intention musicale. Pourtant des expériences récentes montrent que la simple reproduction de l’évolution de pression dans la bouche ne permet pas de retrouver avec une bouche artificielle les seuils de bifurcation entre régimes mesurés sur un instrumentiste. L’instrumentiste expérimenté est capable de jouer plus fort que la bouche artificielle sur le premier registre. En revanche, le débutant ne fait pas mieux que la bouche artificielle. Des expériences sont en cours (stage de S. Terrien) pour mieux caractériser les différences et proposer des explications. L’influence du conduit vocal est un bon candidat, mais d’autres facteurs (liés à l’écoulement dans la bouche en particulier) ne sont pas à exclure.

Souffler n'est pas jouer ... asservir (aussi) la pince (coll. projet ANR SDNS-AIMV)

Dans le cadre du projet ANR SDNS-AIMV⁵ (2010-2013), un objectif important est de proposer une version de la bouche artificielle dédiée aux instruments à anche qui assure en plus de l'asservissement en pression d'alimentation, un asservissement de la pince, c'est à dire de la force exercée par la lèvre sur l'anche. Nous avons souligné au paragraphe 2.3 l'importance pour le saxophoniste de la coordination entre ces deux paramètres. Plus généralement, ce projet est centré sur les relations entre la dynamique des paramètres de contrôle et les transitoires dans le son produit. On cherchera donc à approfondir et multiplier les mesures in vivo réalisées sur des instrumentistes. Les résultats seront analysés en regard de ceux obtenus sur la nouvelle bouche artificielle.

De nouveaux instruments de musique ou des instruments de laboratoire ?

Clarinette logique (coll. D. Noreland, J.Kergomard, F. Laloë) Suite à un travail réalisé pendant le second séjour post-doctoral de D. Noreland, auquel je n'ai pas participé, les dimensions optimales d'un d'instrument à anche simple et à résonateur cylindrique (qu'on peut assimiler donc à une clarinette ...) ont été obtenues à partir d'un minimum de principes, comme le fait d'être parfaitement chromatique. Les critères principaux sont : justesse du premier pic d'impédance, inharmonicité pas trop forte afin d'éviter de trop grandes variations de justesse selon la nuance jouée, hauteur des cheminées de trous limitée.

Je suis impliqué dans la validation expérimentale. Un prototype a été fabriqué par A. Busso et S. Devic (atelier mécanique, LMA), et nous avons mené des expériences préliminaires avec la bouche artificielle asservie pour évaluer les qualités du prototype. Mais l'entreprise pose beaucoup de questions de méthode : comment évaluer la justesse d'un instrument sur bouche artificielle alors que l'instrumentiste ajuste en permanence plusieurs paramètres ? L'étude comparative avec une clarinette classique soumise aux mêmes tests peut apporter quelques réponses quant à la caractérisation du prototype, mais les tests avec instrumentiste semblent également incontournables dans le futur.

Anche simple pour hautbois (coll. S. Carral, IWK, Autriche) Le hautbois se joue avec une anche double, dont nous avons présenté la caractérisation au paragraphe 2.2.1. Beaucoup des conclusions obtenues indiquent que l'anche double se comporte comme une anche simple. Cependant du point de vue de la pratique quotidienne de l'instrumentiste, l'anche double apporte beaucoup de difficultés spécifiques : besoin de trempage avant le jeu, finitions des anches neuves nécessaires (grattage, ajustements divers ...), technique de jeu spécifique. Peut-on, au moins pour les débutants, remplacer l'anche double par une anche simple ? Nous ne sommes pas les premiers à nous poser la question et des tentatives ont été commercialisées au siècle dernier, avec peu de succès semble-t-il. En revanche, pour le basson, un tel bec est commercialisé.

Sans présager des réactions des hautboïstes, ce projet est intéressant car il nous plonge dans une problématique de facture instrumentale : quels arguments scientifiques peut-on retenir dans l'établissement d'un prototype de bec à anche simple ? comment évaluer les résultats obtenus ?

Le premier prototype que nous avons construit⁶ est encourageant : en utilisant une anche

5. Systèmes Dynamiques Non Stationnaires : Application aux Instruments de Musique à Vent. Porteur du projet : A. Almeida, LAUM.

6. qui fait suite à trois prototypes antérieurs de S. Carral

simple de clarinette, nous obtenons un instrument qui fonctionne. Les impressions des quelques hautboïstes l'ayant essayé soulignent des défauts de justesse (que l'on peut tenter de corriger en jouant sur le volume du bec) et un timbre trop brillant.

Chapitre 3

Réduction de modèle : différents objectifs, différentes approches. De l'analyse à la synthèse sonore

Sommaire

3.1	Introduction	43
3.2	Réduction par différentes approches modales	44
3.2.1	Réduction par projection modale sur les modes du résonateur	45
3.2.2	Réduction par projection sur les POM	45
3.2.3	Réduction à l'aide d'un unique mode non linéaire	48
3.2.4	Synthèse : réduction de modèle appliquée aux instruments à vent	51
3.3	Réduction d'une EDP de transport non linéaire amorti en un système entrée-sortie : application au cuivrage	53
3.4	La synthèse sonore : un cas particulier de réduction	55
3.4.1	Introduction	55
3.4.2	Exemples de synthèse sonore et différentes utilisations	56
3.4.3	Contrôle de la synthèse sonore	58
3.5	Discussion : deux défis pour la synthèse sonore	61
3.5.1	De bons candidats pour des applications musicales grand public ?	61
3.5.2	De bons candidats pour une aide à la facture ?	62
3.6	Perspectives	63

3.1 Introduction

La réduction de modèle s'entend ici comme toute tentative d'obtenir une bonne approximation du modèle original avec une complexité moindre. La motivation peut être la réduction des temps de calculs pour la simulation numérique, mais pas seulement. En effet, un modèle réduit se prête souvent mieux à l'analyse, soit parce que le nombre de paramètres est plus faible que pour le modèle original (c'est un des avantages de l'adimensionnement, [HKW95]) soit parce que le modèle

réduit se ramène localement à une forme archétypique référencée dans la littérature et avec de nombreux résultats publiés. C'est le cas des formes normales, systèmes non linéaires minimaux qui reproduisent chacun un type de bifurcation [Man04].

Dans le contexte des instruments de musique à vent, qui couplent un excitateur localisé à un résonateur réparti (le corps de l'instrument), la première réduction est d'abord spatiale : plutôt que de considérer un modèle qui donnerait pression et vitesse acoustique partout dans l'instrument, on cherche souvent à représenter le fonctionnement de l'instrument par un système entrée/sortie qui ne donne accès aux variables qu'aux points stratégiques [MSW83] : typiquement le point de couplage excitateur/résonateur (où la physique est fondamentalement non linéaire) et éventuellement un point en sortie d'instrument pour l'accès au champ rayonné.

Lorsque la propagation dans le corps de l'instrument est linéaire (ce qui est le cas la plupart du temps sauf pour les cuivres à fort niveau sonore [HGMW96], ou pour les clarinettes dans des cas extrêmes [GLD10]), on peut par exemple utiliser une approche modale pour représenter la dynamique du résonateur (paragraphe 3.2.1). Les variables liées au résonateur sont alors les coordonnées modales et leurs dérivées temporelles. Se pose alors la question de la réduction du nombre de degrés de liberté du modèle. En utilisant des approches modales différentes, est-il possible de diminuer le nombre de variables à prendre en compte, et au prix de quelle dégradation du résultat ? Cette question est abordée en posant la question du choix de la famille de modes linéaires selon un critère d'optimalité (POM, paragraphe 3.2.2) et en séparant les aspects géométriques et temporels de la dynamique dans l'espace des phases (modes non linéaires, paragraphe 3.2.3).

Dans le cas des cuivres cependant, la propagation devient rapidement non linéaire lorsque le niveau sonore augmente. Rien ne garantit alors qu'il soit possible de réduire à un système entrée/sortie l'EDP de transport non linéaire qui décrit la propagation dans ce cas. Nous présentons au paragraphe 3.3 une solution dans un cas simplifié de propagation non linéaire avec pertes indépendantes de la fréquence.

Un cas particulier de réduction de modèle est celui où le degré de réduction à atteindre n'est pas quantifiable directement en termes de nombre de degrés de liberté. C'est le cas pour la synthèse sonore temps-réel (paragraphe 3.4), dont ce n'est d'ailleurs pas la seule spécificité puisqu'y sont attachées des questions relatives au contrôle des modèles.

3.2 Réduction par différentes approches modales

Nous avons considéré différents types de décomposition modale :

- les modes de résonateurs (supposés linéaires), qui sont eux-mêmes linéaires et peuvent être complexes (modes dits de résonance) quand on prend en compte le rayonnement ou l'amortissement dû aux interactions visco-thermiques aux parois. C'est cette approche qui a été retenue pour simuler le fonctionnement des instruments à anche et cuivres dans le logiciel MOREESC (paragraphe 3.2.1, [11, 59, 60]).
- les modes linéaires orthogonaux adaptés (Proper Orthogonal Modes) qui constituent la base orthogonale la mieux adaptée pour reconstruire (au sens de l'énergie) un signal de référence (paragraphe 3.2.2, [58]).
- les modes non linéaires, solution du problème complet, qui peuvent être définis de plusieurs façons, et sont une extension, dans un sens défini ci-dessous, des modes du problème linéarisé

(paragraphe 3.2.3, [69, 12]).

A ceux-là s'ajoutent les modes du problème linéarisé, qui sont linéaires et complexes ; ils sont solution du problème complet seulement pendant une brève fraction des transitoires. Ces modes ont été étudiés dans un contexte voisin du nôtre par J. Kergomard et al. [KDM06].

De nombreuses références sont disponibles pour l'application de ces différentes techniques à des systèmes non entretenus. On recense cependant beaucoup moins de références relatives à l'étude de systèmes auto-oscillants.

3.2.1 Réduction par projection modale sur les modes du résonateur

Collaborateurs : F. Silva (thèse), Ph. Guillemain, J. Kergomard

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la thèse de Fabrice Silva [Sil09] sur les instruments à anche. Lorsqu'on projette les équations du modèle physique complet d'un instrument à vent comme la clarinette sur les modes complexes du résonateur, on obtient un ensemble d'équations différentielles ordinaires d'ordre 1 non linéairement couplées par un terme faisant intervenir le débit entrant dans l'instrument. Le modèle est rappelé en annexe 7.1.

En modifiant le nombre de modes pris en compte dans le calcul, on obtient une méthode numérique dans laquelle on peut contrôler assez intuitivement le compromis "coût de calcul / précision des résultats". Ce travail avait été abordé par Vincent Debut dans sa thèse ([Deb04], dir. J. Kergomard) pour une anche vue comme un simple ressort sans dynamique. Fabrice Silva a prolongé cette approche quand on prend en compte un mode de vibration de l'anche [59] puis lorsque les modes du résonateur deviennent complexes (prise en compte de l'amortissement visco-thermique et/ou du rayonnement). Ainsi, le calcul en modes complexes a été implémenté, et permet de prendre en compte de façon correcte le rayonnement, à partir d'un calcul de résidus [Sil09]. Quelques détails sont données en annexe 7.1.3.

Ce travail est mis à disposition sous la forme d'un logiciel libre MOREESC distribué sous licence CECILL [83]. Ce logiciel permet de réaliser des simulations temporelles ab initio lorsqu'un ou plusieurs paramètres de contrôle varient. Cela permet d'explorer les différents régimes de jeu de l'instrument ou d'étudier l'influence de la dynamique des paramètres du modèle. Pour illustration, la figure 3.1 présente l'influence du temps de montée de la pression d'alimentation.

3.2.2 Réduction par projection sur les POM (*Proper Orthogonal Modes*)

Collaborateurs : S. Bellizzi, K. Ege (stage), S. Vial (stage), F. Silva (thèse)

Les modes propres orthogonaux (Proper Orthogonal Modes, dits POM) sont obtenus par l'analyse (Proper Orthogonal Decomposition, dite POD) des champs oscillants produits par le modèle ou l'instrument. L'idée principale est de passer d'un grand nombre de variables couplées à un nombre plus petit de variables décorréées, en essayant de conserver au mieux la variance des données initiales. Pour cela, on considère la base formée par les vecteurs propres de la matrice de covariance des données (les POM). Les données originales sont ensuite projetées sur le sous-espace engendré par les vecteurs propres associés aux N valeurs propres les plus grandes. Une propriété intéressante est l'optimalité de cette décomposition au sens de l'erreur quadratique moyenne : pour un nombre de vecteurs donné N , les POM sont ceux qui permettent de reconstruire au mieux au

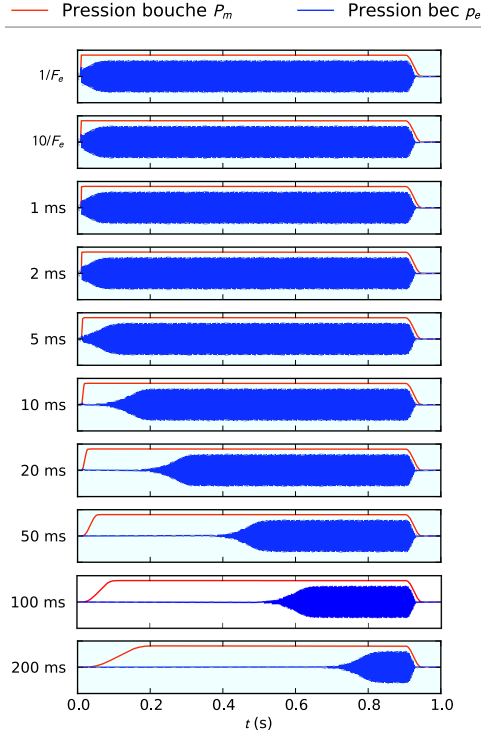


FIGURE 3.1 – Illustration de résultats produits par le logiciel MOREESC lorsque le temps de montée de la pression dans la bouche (en rouge) varie. Les temps de montée sont indiqués à gauche de chaque courbe. Figure extraite de la soutenance de thèse de F. Silva [Sil09].

sens de l'énergie le champ ayant servi à l'analyse.

Appliquée au domaine des statistiques [Fou97] l'approche est connue sous le terme d'Analyse en Composante Principale (ACP) ou méthode de Karhunen-Loève (KLD) pour les processus stochastiques. Appliquée au domaine des vibrations [KGVB05], elle permet de décomposer un champ vibratoire sous la forme d'une décomposition modale.

Analyse des données produites par le modèle

A partir des simulations numériques produites par un modèle de cuivre à résonateur cylindrique (détail du modèle en annexe 7.2), nous avons réalisé des décompositions en POM, mises en perspective avec ce que l'on connaît par ailleurs du comportement du modèle [58]. Il en ressort que le premier POM (le plus énergétique) se rapproche toujours du mode du résonateur principalement impliqué dans l'auto-oscillation. Mais au fur et à mesure que l'on s'écarte du seuil d'oscillation, la forme du premier POM passe progressivement du mode du résonateur (fermé/ouvert) à un mode s'approchant de celui d'un résonateur ouvert/ouvert. Ceci est illustré en figure 3.2, et est d'ailleurs visible pour les deux autres modes représentés (mais dans une moindre mesure). L'origine de ce résultat surprenant est sans doute à chercher du côté du débit de plus en plus grand injecté à l'entrée du résonateur alors que les modes linéaires du résonateur sont calculés au départ pour une condition limite de type Neuman à l'entrée (résonateur fermé, pas de débit entrant).

Ainsi, l'analyse POD permet de traduire, à partir de l'analyse des données produites par la simulation, l'évolution de la structure linéaire sous-jacente au problème non linéaire (qui est a priori d'autant plus différente de la linéarisation du problème non linéaire que l'on s'éloigne du seuil d'oscillation).

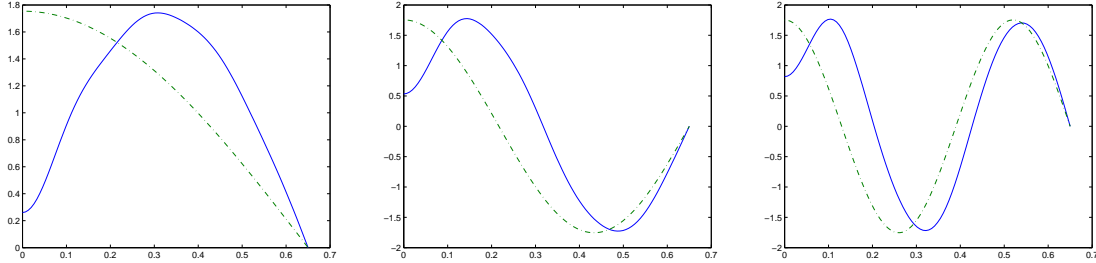


FIGURE 3.2 – Comparaison successive des trois premiers POM spatiaux (trait plein) et des trois premiers modes du résonateur cylindrique (trait pointillé) pour un modèle de cuivre à résonateur cylindrique (loin du seuil d'oscillation). En abscisse : variable d'espace (m). En ordonnée : déformée (normalisée). Extrait de [58].

Lorsque le champ de référence contient des variables à très faible variance, leur reconstruction par les POM est mauvaise. C'est le cas dans les modèles d'instruments à anche (ou cuivres) lorsque le champ de référence contient les variables relatives au déplacement de l'anche, en plus des variables acoustiques. Dans ce cas, nous avons utilisé une approche où les différentes variables formant le champ de référence sont normalisées avant application de la POD. Cette normalisation fait intervenir la racine carrée de la variance de chaque variable. On parle alors de NPOM [RCM06]. Nos essais ont montré que l'on obtient alors une qualité de reconstruction plus équilibrée sur l'ensemble des composantes. De plus, même sur des composantes à plus forte variance, l'approche NPOD permet de donner plus d'importance à la forme temporelle du signal (même si la solution optimale en terme d'énergie reste celle fournie par la POD). Par exemple, dans une situation d'anche battante, où le signal est quasiment carré, deux NPOD suffisent à donner l'allure du signal alors qu'au moins 8 POM sont nécessaires (rapport de stage B. Vial, figures p71 et p80).

Construction d'un modèle réduit

En plus d'éclairer l'analyse du comportement d'un modèle, la POD permet de construire un modèle réduit : les équations du modèle sont projetées sur les POM retenus (dans le même esprit qu'en 3.2.1 mais plus sur les modes du résonateur). On peut ainsi réduire le nombre de degrés de liberté du modèle (ce qui est bienvenu pour l'analyse) et donc le coût de calcul (ce qui est toujours recherché, pour la synthèse sonore en temps réel par exemple).

Cependant, si la propriété d'optimalité de la POD s'applique pour la reconstruction du champ de référence sur la base tronquée à N POM, nous n'avons aucune garantie sur la proximité entre le modèle original et le modèle réduit. La dynamique des modèles réduits est donc à explorer, et les résultats dépendent du champ de référence choisi pour la détermination des POM sur lesquels se fait la projection. Lors du stage de B. Vial, nous avons entamé ce travail qui pose beaucoup de questions. On peut déjà dire que le fait que le modèle soit auto-oscillant semble être une difficulté.

Par exemple, le seuil d'oscillation n'est pas toujours préservé : un modèle réduit utilisant des POM déterminés à partir d'un champ auto-oscillant ne présente pas systématiquement d'auto-oscillation pour des valeurs de paramètres identiques. Des études ont mis en évidence sur les systèmes forcés l'influence du champ de référence sur la capacité du modèle réduit à reproduire certains comportements [KFG03]. Il existe aussi des moyens de prédire l'écart entre les données produites par le modèle réduit et le modèle original [HPS05] mais nous n'avons pas encore abordé cette question.

3.2.3 Réduction à l'aide d'un unique mode non linéaire

Collaborateurs : S. Bellizzi, R. Bouc, D. Noreland (post-doctorant)

Plutôt que de projeter la dynamique sur des plans dans l'espace des phases (c'est le cas lorsqu'on utilise des modes linéaires), une approche alternative consiste à trouver la variété invariante sous-jacente à la dynamique du modèle et à se placer sur cette variété (qui définit un mode non linéaire, ou MNL) où la dynamique s'écrit alors plus simplement. Un unique MNL peut alors suffire pour représenter avec un bon degré d'approximation la dynamique du modèle original.

La première difficulté est donc de savoir comment définir la variété invariante qui définit le MNL. Nous suivons l'approche de Shaw et Pierre [SP91, SP93] : ce sont des variétés invariantes de l'espace des phases, tangentes au niveau du point d'équilibre au mode linéaire (qui apparaît comme un plan). Une seconde difficulté est la recherche de cette variété. Nous avons choisi pour calculer les modes non linéaires, une approche proposée par S. Bellizzi et R. Bouc [BB05], dite formulation amplitude/phase : la variété invariante (le mode non linéaire recherché) est paramétrée par une variable d'amplitude et une variable de phase. La dynamique modale sur la variété (c'est à dire l'évolution temporelle du système) est donnée par deux équations différentielles ordinaires d'ordre 1. Le lecteur non spécialiste désireux de se représenter plus précisément ce qu'est un MNL tel que défini par [BB05], en particulier par rapport au cas linéaire, pourra consulter le tableau 3.1. Une qualité importante de la méthode est sa compatibilité avec les situations de résonance interne (deux valeurs propres au moins du système linéaire proportionnelles) ce qui est le cas pour les modèles considérés d'instruments à vent. Traiter les résonances internes n'est cependant pas l'apanage de cette méthode : par exemple Touzé et al. [TOC04], ont développé une méthode en liaison avec les formes normales qui s'en accommode aussi.

Le modèle de clarinette considéré correspond au modèle à deux équations décrit en annexe 7.1.2 avec une décomposition modale du résonateur similaire à celle décrite en annexe 7.1.3 (modes réels). Nous retenons trois modes réels pour décrire l'acoustique dans le résonateur (fréquences de résonance quasiment dans un rapport de multiplicité impair : f_1 , $3f_1$, $5f_1$), ce qui autorise au moins trois régimes périodiques associés à ces modes (appelées registres en langage musical).

Les systèmes à résoudre définissant la variété invariante et les deux équations scalaires caractéristiques de la dynamique dans la variété, sont cependant non triviaux et font partie de la classe des systèmes algébro-différentiels : équations aux dérivées partielles (suivant les variables amplitude-phase) couplées à des équations algébriques. Une discrétisation des fonctions inconnues suivant la variable phase (approche quasi-spectrale) a permis de ramener le problème à un système algébro-différentiel suivant la seule variable amplitude. Ce système est ensuite résolu à l'aide d'un schéma numérique de type Euler rétrograde. C'est en jouant sur le choix de la condition initiale

Modes d'un système linéaire conservatif	Modes d'un système linéaire amorti	Modes non linéaires (MNL), selon l'approche [BB05]
<p>Une famille de solutions périodiques est associée à chaque mode normal :</p> $\mathbf{P}(t) = v\mathbf{X}(\phi(t))$ <p>avec</p> $\begin{cases} \mathbf{X}(\phi) &= \mathbf{\Psi}_p \cos(\phi) \\ \phi(t) &= \Omega_p t + \varphi \\ v &= a \text{ (constante)} \end{cases}$ <p>L'amplitude et la fréquence du mouvement périodique sont respectivement données par v et $\Omega_p/2\pi$. La fonction \mathbf{X} est 2π périodique en la variable ϕ.</p>	<p>La famille de solutions associée à chaque mode est :</p> $\mathbf{P}(t) = v(t)\mathbf{X}(\phi(t)) \quad (3.1)$ <p>avec :</p> $\begin{cases} \mathbf{X}(\phi) &= \mathbf{\Psi}_p^c \cos \phi \dots \\ &\dots - \mathbf{\Psi}_p^s \sin \phi \\ \phi(t) &= \Omega_p t + \varphi \\ v(t) &= ae^{\eta_p t} \end{cases} \quad (3.2)$ <p>Suivant le signe de η_p, le mouvement est amorti ($\eta_p < 0$), amplifié ($\eta_p > 0$), ou périodique ($\eta_p = 0$). L'amplitude et la fréquence instantanées sont respectivement $v(t)$ et $\Omega_p/2\pi$. Ici encore \mathbf{X} est une fonction 2π périodique en la variable ϕ.</p>	<p>Les inconnues et leur dérivée temporelle (\mathbf{P} et $\dot{\mathbf{P}}$) sont recherchées sous la forme :</p> $\begin{cases} \mathbf{P}(t) &= v(t)\mathbf{X}(v(t), \phi(t)) \\ \dot{\mathbf{P}}(t) &= v(t)\mathbf{Y}(v(t), \phi(t)) \end{cases} \quad (3.3)$ <p>avec \mathbf{X} et \mathbf{Y} des fonctions 2π-périodiques en la variable ϕ. Les variables d'amplitude et de phase v et ϕ sont gouvernées par un système différentiel d'ordre 1 :</p> $\begin{cases} \dot{v}(t) &= v(t)\xi(v(t), \phi(t)) \\ \dot{\phi}(t) &= \Omega(v(t), \phi(t)) \end{cases}$ <p>avec $\begin{cases} v(0) &= a \\ \phi(0) &= \varphi \end{cases}$.</p> <p>Les variables Ω (modulation de fréquence) et ξ (modulation d'amplitude) sont des fonctions scalaires et sont choisies impaires et π-périodiques en la variable ϕ. Les conditions initiales sont fixées par $\varphi \in [0, 2\pi]$ et $a > 0$. Un MNL est caractérisé par \mathbf{X}, \mathbf{Y}, Ω and ξ.</p>

TABLE 3.1 – Introduction à ce qu'est un mode non linéaire tel que défini par Bellizzi & Bouc [BB05] (colonne de droite) par rapport au cas linéaire conservatif (colonne de gauche) et non conservatif (colonne centrale) .

qu'il est possible de calculer les différents modes non linéaires. La figure 3.3 présente à titre illustratif la reconstruction de la variété invariante, i.e. d'un MNL (surface orange) et de la dynamique qui y est inscrite (courbe noire) dans l'espace des configurations (p_1, p_2, p_3) . A chaque registre correspond un MNL. Dans [12] nous avons aussi montré que :

- Au-delà du seuil d'oscillation, il y a existence d'un cycle limite stable. L'existence d'un cycle limite dans la variété se traduit par l'existence d'une solution périodique au système des équations scalaires définissant l'évolution de l'amplitude v et de la phase ϕ . Ce résultat n'était pour l'instant démontré pour ce type de modèle que près du seuil d'oscillation (bifurcation de Hopf directe, [GGL96], [14]). A noter que la stabilité est démontrée, dans un premier temps, dans la variété uniquement. La stabilité "globale" du cycle limite (dans tout l'espace des configurations) a ensuite été obtenue en faisant une étude des multiplicateurs de Floquet.
- Un modèle réduit à un unique mode non linéaire permet de reproduire la dynamique du modèle original, que ce soit en régime transitoire ou en régime établi (figure 3.4, gauche). L'erreur semble croître au cours du temps (colonne de droite) mais cela est le résultat d'un léger désaccord en fréquence avec la solution obtenue par simulation numérique directe.

Cette approche est également intéressante à plusieurs égards :

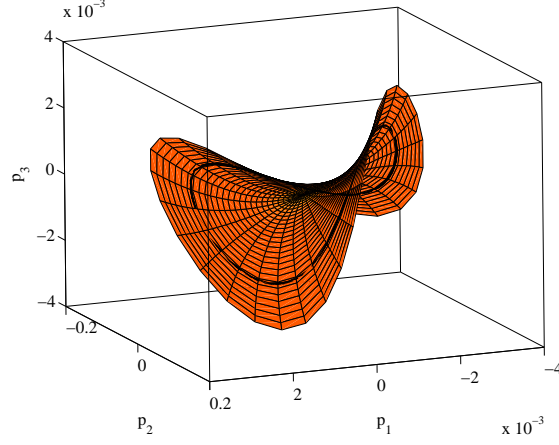


FIGURE 3.3 – Variété courbe représentant le second mode non linéaire de la clarinette, représenté dans l'espace des configurations (ici les coordonnées modales associées aux trois modes linéaires du résonateur). Sur cette variété invariante est représenté le cycle limite correspondant au second registre de la clarinette, pour des conditions initiales choisies sur la variété. Figure extraite de [12].

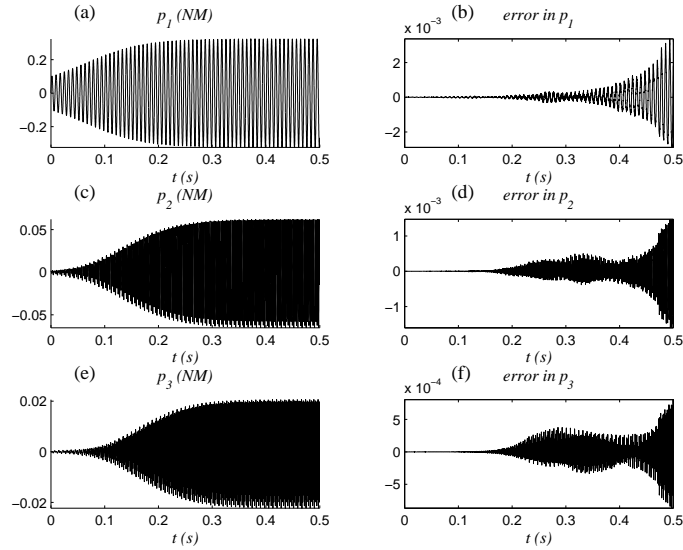


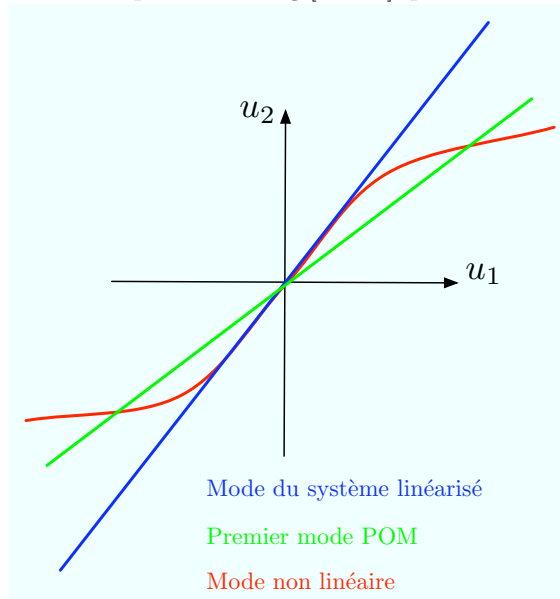
FIGURE 3.4 – Comparaison de la dynamique temporelle du modèle réduit à un mode non linéaire, et de la simulation numérique directe du modèle de clarinette de départ, en régime transitoire et établi. Ici les conditions initiales sont telles que la dynamique prend place sur le premier MNL. Figure extraite de [12].

- Accès immédiat à l’amplitude et à la fréquence instantanées de la solution sans avoir besoin du signal temporel (et donc sans résoudre le système complet).
- Accès direct à la solution à un temps t quelconque sans recours au calcul aux t antérieurs.
- Possibilité de calculer des dynamiques instables (transitoires ou régimes établis).
- Calcul des cycles limites sans aucun calcul dans le domaine temporel.

Les limites de l’approche actuelle résident dans l’impossibilité de calculer le mode non linéaire au delà d’une amplitude limite (problème de convergence), bien en deçà de la dynamique maximale de la clarinette. Malgré de nombreuses tentatives, nous ne parvenons pas encore à expliquer la cause de ce phénomène. De plus, il convient de préciser que la variété (et donc la dynamique) est calculée pour des paramètres de contrôle constants. Ainsi une application de la méthode à la synthèse sonore temps réel (ou les paramètres de contrôle sont modifiés pour reproduire l’action du musicien, cf. paragraphe 3.4) n’apparaît pas directement envisageable. En revanche, l’approche est bien adaptée à l’analyse de la dynamique des modèles.

3.2.4 Synthèse : réduction de modèle appliquée aux instruments à vent

Illustration géométrique des liens entre les différents types de modes : En guise de synthèse, tentons d’abord dans un but pédagogique de représenter les différents types de modes dans le cas simple d’un espace de configuration de dimension 2 et pour un système conservatif. On adopte là la représentation utilisée par Rosenberg [Ros62] qui fait intervenir les ”lignes modales”.



Pour extrapoler au cas d’un système non conservatif (comme c’est le cas pour les instruments de musique), il faut utiliser non plus l’espace des configurations mais l’espace des phases : les modes linéaires deviennent des plans, et les modes non linéaires des variétés bi-dimensionnelles tangentes à l’origine aux modes du système linéarisé. Au début du transitoire et/ou près du seuil d’oscillation, la trajectoire se fait sur le mode du système linéarisé. Par contre la trajectoire complète s’inscrit dans le mode non linéaire. Dans l’espace des configurations, le POM de valeur propre la plus élevée dirige la droite vectorielle qui minimise la somme des carrés des distances des points de la trajectoire à cette droite. Il est donc la ”meilleure” approximation linéaire du mode non linéaire.

Passer d'un type de mode à l'autre peut s'envisager comme un changement de variable linéaire ou non linéaire (cas des MNL).

Classement entre les différents types de modes : Nous proposons maintenant une hiérarchisation des différents types de modes dans divers contextes :

1. Prise en compte du couplage non linéaire entre degrés de liberté :
 - (a) Mode non linéaire : représente bien le couplage autour d'un point d'équilibre.
 - (b) POM : meilleure approximation linéaire de ce couplage.
 - (c) Modes linéaires complexes du résonateur : chaque mode est un degré de liberté du modèle.
2. Réduction de modèle :
 - (a) Mode non linéaire : pour un régime périodique donné, un seul MNL suffit.
 - (b) POM : au pire il faut autant de POM que de modes.
 - (c) Modes linéaires complexes du résonateur : fixe le nombre de degrés de liberté du modèle original.
3. Aptitude du modèle réduit à reproduire des régimes du modèle de départ :
 - (a) Mode linéaires complexes du résonateur : c'est le modèle original.
 - (b) POM : l'optimalité est garantie uniquement pour le champ de référence
 - (c) Mode non linéaire : $1\text{MNL} \equiv 1$ registre, donc l'approche reste "locale"
4. Adapté à la synthèse sonore temps-réel :
 - (a) Mode linéaires complexes du résonateur
 - (b) POM : nombre de ddl inférieur mais modèle réduit approché \Rightarrow à évaluer!
 - (c) Mode non linéaire : la variété doit être recalculée pour chaque variation de paramètre

Conclusion : Les modes non linéaires sont les plus efficaces en terme de réduction de modèle, et s'avèrent pertinents pour une analyse des modèles (ils permettent d'aborder les différents régimes d'oscillation, la stabilité des solutions, donnent un accès direct à l'amplitude et à la fréquence instantanées, et permettent une simulation directe à moindre coût). Par contre ils nécessitent un important travail pour aboutir au modèle réduit, travail à reproduire dès qu'un paramètre change de valeur. Au contraire dans le cadre du développement de l'outil numérique MOREESC, nous avons retenu l'utilisation des modes complexes du résonateur. Ils permettent à l'utilisateur d'accéder rapidement aux résultats de simulation, avec un contrôle direct du niveau de réduction (troncature modale).

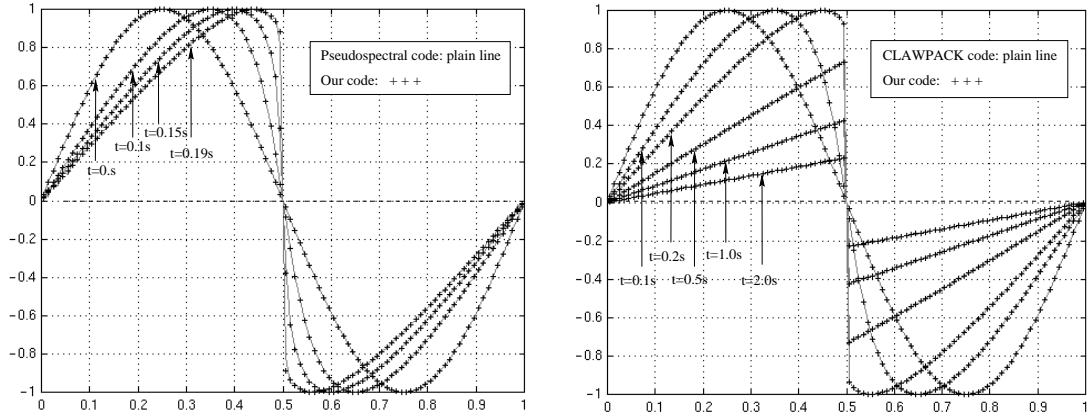


FIGURE 3.5 – Comparaison de résultats entre l’algorithme proposé, une résolution quasi-spectrale (à gauche) et le code CLAWPACK [Lev94]. Figure extraite de [4].

3.3 Réduction d’une EDP de transport non linéaire amorti en un système entrée-sortie. Application au phénomène de cuivrage

Collaborateur : Th. Hélie (Ircam)

Lorsque le niveau sonore augmente, l’évolution du son des cuivres est caractérisé par un enrichissement spectral. On parle aux forts niveaux sonore de sons ”cuivrés”. Le phénomène physique responsable est la propagation non linéaire, qui distord progressivement l’onde progressive. Le phénomène est cumulatif sur la distance de propagation et peut conduire à des effets spectaculaires comme la formation d’ondes de choc [HGMW96, GP97].

Le modèle le plus simple qui prenne en compte ce phénomène est donné par l’équation de l’onde simple (cf. par exemple Pierce [Pie89]) :

$$\frac{\partial p}{\partial t} + (c_0 + \alpha p) \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad (3.4)$$

où $p(x, t)$ est la pression acoustique fonction de l’espace et du temps, α un coefficient qui regroupe plusieurs constantes physiques, et c_0 la vitesse du son. Ce modèle, qui est en fait une équation de transport non linéaire, traduit le fait que chaque point de l’onde se déplace à une vitesse $c_0 + \alpha p$. Ce modèle n’est pas dissipatif.

Dans [4] nous avons montré qu’il était possible de considérer cette EDP comme un système entrée/sortie : à partir du seul signal à l’entrée (en $x = x_e$), on peut calculer le signal à la sortie (en $x = x_s$) sans aucun calcul à une position intermédiaire. Pour les solutions fortes de (3.4), la méthode des caractéristiques permet d’obtenir un tel résultat [HB98]. Mais l’algorithme proposé permet d’aller plus loin et fournit la solution faible entropique (si le choc est symétrique), comme le montre la figure 3.5 pour différentes distances de propagation $x_s - x_e$.

L’inclusion au modèle physique global de cuivres permet des évolutions spectrales plus conformes aux mesures lors de variations du niveau sonore (comme pour une attaque ou pour un crescendo).

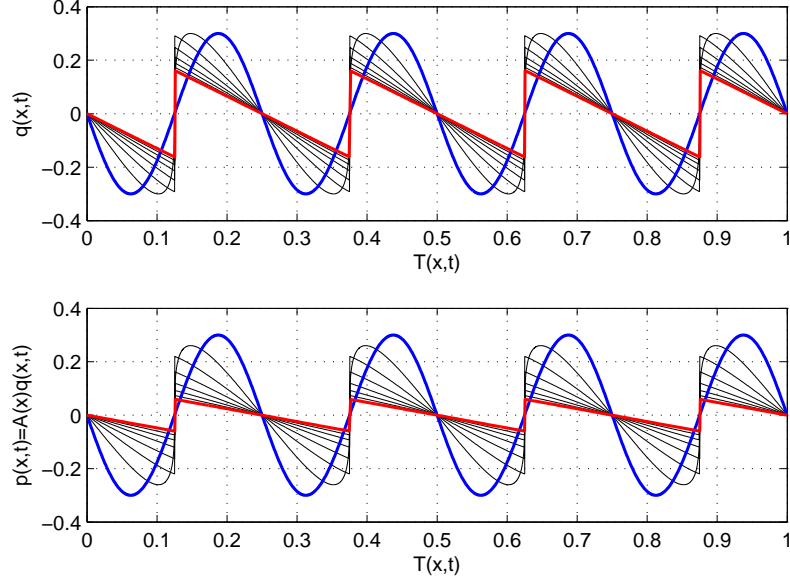


FIGURE 3.6 – Solutions fortes ou faibles pour plusieurs distances de propagation $x = nx^*$ pour $0 \leq n \leq 7$ avec x^* la distance de formation du choc. En haut : $q(x, t)$ solution de l'EDP conservative ; en bas : $p(x, t)$ solution de (3.5) déduit de $q(x, t)$ par changement de variable inverse. Extrait de [65].

Ce travail a par ailleurs débouché sur le dépôt d'un brevet [79], qui a donné lieu en 2005 à un accord de licence avec la société Arturia.

Plus récemment, nous avons montré avec Thomas Hélie [65] qu'une équation de transport plus générale que l'équation (3.4) pouvait être résolue comme un système entrée-sortie :

$$\partial_t p + c(x, p) \partial_x p = -\alpha(x) c(x, p) p, \quad (3.5)$$

Ce modèle décrit le transport d'une onde simple, soumise à un amortissement de coefficient α indépendant de la fréquence et variant dans l'espace, et qui se propage avec la célérité locale $c(x, p(x, t))$. Ce modèle dépasse donc le cadre de l'acoustique musicale où le milieu est homogène.

La méthode repose sur deux éléments : un changement de variable permet d'abord de ré-écrire une EDP conservative vérifiée par une nouvelle variable $q(x, t)$, puis cette équation est résolue en introduisant un potentiel [HHK69, Cou09] qui devient multivalué en cas de choc, mais dont les propriétés permettent de sélectionner les branches de solutions entropiques à retenir. Un exemple est montré en figure 3.6, dans le cas d'un signal sinusoïdal en entrée (courbe bleue). Les solutions tracées à différentes distances de la source sont indépendantes. Il s'agit bien d'un système entrée-sortie : il n'est pas nécessaire de procéder de proche en proche, la sortie en x se déduit directement du signal à l'entrée en $x = 0$.

Un premier intérêt de l'approche présentée dans cet article est de séparer lors de la propagation les effets liés à l'amortissement (indépendant de la fréquence) et ceux liés au transport non linéaire (cf. figure 3.6). Un second intérêt est que le coût de calcul n'est pas plus important en présence de choc, ou même de chocs multiples. Cette qualité sera exploitée pour simuler en temps-réel le

fonctionnement des cuivres à fort niveau sonore, et étendre les algorithmes de synthèse sonore existant qui sont limités, soit à une propagation sans perte et aux solutions fortes [MDCT00] ou aux solutions faibles correspondant à des chocs symétriques [4], soit à une propagation avec pertes visco-thermiques et aux solutions fortes [HS08].

Cette méthode peut être utilisée à des fins de simulation numérique, éventuellement d'ailleurs hors contexte acoustique musicale puisque l'équation (3.5) est assez générale et représentative d'un transport non linéaire avec amortissement dans un milieu non homogène. Malgré sa simplicité, le terme d'amortissement constant en fréquence a souvent été considéré, comme le montrent les revues bibliographiques de Grimshaw [RGEPTT03] ou Makarov et Ochmann [MO97] : pour modéliser la friction linéaire induite par une couche limite turbulente [Bri88], les effets de la relaxation à haute fréquence [KS64], l'absorption dans des fluides stratifiés [Cri79], l'amortissement visco-élastique dans les fluides [VR67], l'absorption dans des fluides faiblement conducteurs [Kor90] ...

Dans le contexte des instruments à vent, ce travail trouve une utilisation naturelle en synthèse sonore, un cas particulier de réduction de modèle qui est introduit au paragraphe suivant.

3.4 La synthèse sonore : un cas particulier de réduction

3.4.1 Introduction

La synthèse sonore est la création de sons par ordinateur [RSA⁺96]. Le son généré peut être issu d'opérations abstraites de traitement du signal, ou de la simulation numérique d'un système physique producteur de son. Dans ce dernier cas, on parle de synthèse par "modèle physique". L'avantage de cette approche est de disposer d'un générateur de son qui réagit comme l'instrument modélisé, lorsqu'on modifie les paramètres du modèle. Ces paramètres ont un lien direct avec la physique, puisqu'ils interviennent dans les équations constituant le modèle, et offrent donc un contrôle intuitif du synthétiseur de sons. Pour résumer, l'objectif de la synthèse sonore par modèle physique est d'aboutir à des instruments virtuels.

La première synthèse sonore par modèle physique remonte à 1971 (une corde pincée, [HR71]). Il faut attendre 1980 pour entendre la première synthèse d'un instrument complet (le piano, [Wei80, Wei81]). Mais pour les instruments entretenus, l'article fondateur est celui de MacIntyre et coll. [MSW83], qui propose pour les différentes classes d'instruments, des représentations facilement utilisables dans des algorithmes. Quelques articles de synthèse permettent de vérifier que même si la discipline est assez jeune, elle n'en est pas moins foisonnante [JOS04, VPEK06].

La question du temps de calcul s'est rapidement imposée et a orienté la structuration des modèles en sous-systèmes entrée-sortie. En effet, par rapport à des descriptions faisant intervenir la, ou les variables d'espace, ces représentations peuvent s'intégrer facilement dans des algorithmes rapides qui utilisent des retards, des convolutions, des fonctions de transfert ... Cette structuration, qui perdure encore largement aujourd'hui (avec des exceptions [Bil09, TR03]) est aussi due en partie au caractère multiphysique des instruments de musique : un modèle de synthèse est un agrégat de sous-modèles issus de différents domaines (mécanique des fluides, acoustique, mécanique du solide), ce qui favorise l'utilisation de blocs plutôt qu'un modèle réparti.

Il est néanmoins important de ne pas réduire la synthèse sonore à une simple application des études physiques. En effet, la synthèse sonore peut, d'une part motiver des études théoriques

(comme la réduction de modèles, une illustration vient d'en être donnée au paragraphe précédent pour la propagation non linéaire), d'autre part jouer un rôle dans l'analyse de modèles (évaluation de la pertinence de certains termes vis-à-vis de la perception, influence d'un paramètre sur le comportement global). Ainsi, le paragraphe 3.4.2 illustre différentes utilisations de la synthèse sonore au travers de projets auxquels j'ai participé.

La synthèse sonore en temps réel pose nécessairement la question du contrôle des modèles, relatif à la modification de la valeur des paramètres du modèle au cours du temps. Comment reproduire un jeu instrumental ? Réintroduire la notion de lien instrument/instrumentiste ? Quels paramètres modifier ? Selon quelles lois ? Le contrôle peut s'envisager comme un problème direct (quelles interfaces pour accéder aux paramètres des modèles ?) ou inverse (quelles approches pour estimer les paramètres et leurs évolutions ?). Ces questions sont abordées au paragraphe 3.4.3.

3.4.2 Exemples de synthèse sonore et différentes utilisations

Nous présentons dans ce paragraphe des utilisations de la synthèse sonore à des fins différentes.

Pour identifier un modèle minimal d'instrument (ex : cuivres)

Collaborateurs : X. Rodet (dir. de thèse)

L'étude des travaux publiés dans la littérature nous a permis de retenir un modèle de départ proposé par Elliott et Bowsher [EB82], très simplifié, mais suffisant pour évoquer à l'écoute un cuivre. Nos efforts ont ensuite consisté à améliorer et développer ce modèle jusqu'à obtenir un réalisme sonore tel qu'une utilisation musicale du modèle soit envisageable. Sans rentrer dans des détails qui sont consignés dans [Ver00], nous avons retenu du modèle d'Elliott et Bowsher la représentation des lèvres par un oscillateur à une masse (masse, ressort et amortisseur) et les hypothèses générales relatives à l'écoulement (jet droit turbulent). Les principales améliorations que nous avons proposées concernent les aspects mécaniques (paramètres des lèvres variables, un degré de liberté supplémentaire aux petites ouvertures), aéro-dynamiques (viscosité de l'air aux petites ouvertures) et acoustiques (représentation mixte modale/fonction de réflexion pour la propagation linéaire, et prise en compte des effets de propagation non linéaire).

Pour analyser ce qui distingue une classe d'instruments (ex : anches doubles)

Collaborateurs : A. Almeida, X. Rodet

Lors de la thèse d'André Almeida, nous avons proposé un algorithme permettant la synthèse sonore en temps réel d'un modèle physique de hautbois (issu des travaux théoriques et expérimentaux présentés en 2.2.1). Ce travail nous a servi à évaluer l'impact sur le son produit de chaque terme du modèle. En particulier, nous avons pu vérifier que la conicité du résonateur (et plus généralement ses dimensions) sont le facteur principal de modification du timbre du son (par rapport aux autres instruments à anche). La prise en compte du modèle de couplage non linéaire décrit en section 2.2.1 joue surtout un rôle sur le son produit dans les régimes transitoires. Des résultats analogues ont été obtenus par Philippe Guillemain avec une implémentation différente [Gui04].

Pour analyser une pratique musicale (ex : flûtes et flutistes Ouldémés)

Collaborateurs : R. Caussé, P. de la Cuadra, B. Fabre, C. Ségoufin



FIGURE 3.7 – Détails du jeu d’une flûte Ouldémé (en haut) et interface gestuelle proposée aux musiciennes pour piloter le modèle de synthèse (en bas). Photos extraites de [46, 47].

En réponse à un appel d’offre ”Cognitique”, nous avons participé en 2000 à un projet coordonné par le LMS (Langues, Musiques, Société, UMR8099) et impliquant trois équipes de l’IR-CAM. L’objectif consistait à fournir aux ethno-musicologues du LMS des outils numériques leur permettant d’étudier et d’analyser la pratique musicale des flutistes de la tribu des Ouldémé (Nord Cameroun). Notre participation concernait plus précisément la modélisation physique du fonctionnement des flûtes Ouldémés [46] ainsi que la réalisation d’un contrôleur MIDI [47] aussi proche que possible de l’instrument traditionnel (sorte de flûte de pan, figure 3.7). En effet, un enjeu important du projet était de recréer des conditions de jeu familières dans un environnement de studio, les instruments traditionnels étant remplacés par des moteurs de synthèse. La rencontre avec les musiciennes camerounaises a eu lieu en avril 2002 au LMS, à Villejuif. Parmi plusieurs solutions testées, l’association du modèle physique et du contrôleur développé pour l’occasion a été retenue. C’est à cette occasion que s’est initiée la collaboration avec B. Fabre sur l’étude de la dynamique des jets turbulents (présentée en section 2.2.2), illustration que la synthèse sonore peut motiver des études plus fondamentales.

Pour inventer des instruments chimériques (ex : Modalys)

Collaborateurs : R. Caussé, N. Ellis, J. Bensoam

J’ai travaillé pendant deux ans sur le logiciel Modalys [80] dans le groupe de recherche Acoustique Instrumentale à l’Ircam. Le logiciel Modalys permet de construire de manière modulaire des instruments producteurs de son (donc des instruments de musique au sens large du terme)

en connectant de manière diverse (frotter, souffler, frapper, pincer), des éléments excitateurs (maillets, plectres, anches ...) et résonateurs (cordes, plaques, barres, membranes, colonnes d'air ...). Toute structure résonnante est modélisée par ses propriétés modales, c'est-à-dire l'ensemble des fréquences propres de la structure ainsi que les amortissements et les déformées spatiales de la structure à ces fréquences de résonance. Les connections sont des fonctions non linéaires.

Cette approche très originale, initiée par J.M. Adrien et ses collaborateurs [AM90, CLA90] permet de construire des instruments inédits inconcevables dans la réalité [40, 68, 80]. Ce logiciel a permis de nombreuses applications musicales (pièces réalisées par des compositeurs) ou industrielles (design sonore du projet de voiture électrique TULIP [MC98], synthèse du bruit de grailonnement d'une boîte de vitesses ...)

3.4.3 Contrôle de la synthèse sonore

Dans ce mémoire, sous le terme contrôle, nous regroupons tout ce qui concerne la modification de la valeur des paramètres du modèle au cours du temps. Se pose d'abord la question des interfaces les mieux adaptées pour modifier ces paramètres en fonction du contexte d'utilisation du modèle. Mais la question peut aussi être posée dans une perspective "problème inverse" : comment estimer les valeurs des paramètres (éventuellement variables dans le temps) du modèle en fonction d'un résultat sonore à obtenir ?

Interfaces temps-réel

Instrument et instrumentiste constituent un système physique possédant de nombreuses variables de contrôle. Leur action sur le résultat est déterminante : on distingue plus facilement deux interprètes jouant du même instrument que deux instruments différents joués par le même interprète.

Pour utiliser un modèle physique, il faut se poser la question de l'accès aux paramètres de contrôle du modèle de synthèse, et en particulier de l'interface (logicielle ou matérielle). Le problème, pour plusieurs raisons, est loin d'être simple. Remarquons d'abord que la question ne se pose qu'avec un instrument de synthèse. Dans le cas d'un instrument acoustique en effet, "instrument" (au sens d'instrument de contrôle) et "principe acoustique" ne font qu'un. Dans le cas d'un modèle de synthèse par contre, il n'en est rien : le principe acoustique est simulé par le modèle physique, mais le geste n'est plus imposé (c'est d'ailleurs selon [WD04] ce qui caractérise un instrument de musique numérique, "Digital Musical Instrument" en anglais dans le texte). L'absence de geste imposé ne signifie pas pour autant que tous les gestes sont aussi efficaces, adaptés au contrôle de la synthèse. Associer gestes pertinents et interfaces adaptées suppose une réflexion approfondie sur le geste, et le sujet ne saurait être traité de manière exhaustive que dans le cadre d'une étude consacrée au geste instrumental [WD04]. Nous restons donc plus pragmatiques dans ce domaine : l'interface de contrôle du modèle définit l'ensemble des moyens d'accès aux paramètres de la synthèse. Dans les travaux auxquels nous avons participé, on peut distinguer trois groupes d'interfaces, chacun répondant à un objectif particulier :

Curseurs et boutons ...

Un premier niveau d'interface, destiné à la recherche, autorise un accès rapide et très précis à

tous les paramètres du modèle (par exemple via une interface graphique). De telles interfaces sont utiles pour paramétrer précisément les modèles ou pour mettre en évidence certains phénomènes particuliers. C'est par exemple en explorant les comportements d'un modèle de trompette via une telle interface qu'a été détectée une route vers le chaos par augmentation de la pression d'alimentation en air ([5, quelques détails au paragraphe 4.3.3]).

Interfaces MIDI

Un deuxième niveau d'interface, destiné au contrôle temps réel et donc plutôt aux applications musicales, est constitué d'entrées pour un ensemble de capteurs MIDI¹ (interrupteurs, pédales, clavier de commande, contrôleur de souffle, etc) très répandus chez les particuliers (voir [Win] pour le matériel dédié aux instruments à vent). C'est ce type d'interface qui sert en général à réaliser des démonstrateurs ([30, 56], [GV03, GV04, GKV05]) ou qui est proposé au grand public dans le cadre d'opérations de valorisations des résultats de la recherche. Pour autant l'utilisation de la norme MIDI est loin d'apporter toute satisfaction. Les problèmes sont d'ailleurs clairement identifiés [SdS05] et bien connus des musiciens : valeur du paramètre codée par défaut sur 7 bits (donc 127 valeurs disponibles), faible bande passante (31Kbauds), limitation de la longueur des câbles...

Meta-instruments

Un troisième niveau d'interface est dédié aux instrumentistes sachant jouer de l'instrument original, puisque ce sont justement leurs "gestes experts" qui sont mesurés par l'interface. Plusieurs motivations existent :

- Il peut s'agir d'ambitions musicales en facilitant la prise en main par un instrumentiste de l'instance virtuelle de son instrument. A ce titre, nous avons travaillé à une méta-trompette à la fin de la thèse (réalisée par P. Pierrot, atelier électronique, et A. Terrier, atelier mécanique, Ircam) : l'ensemble des capteurs est situé sur une véritable trompette, et ce sont plusieurs gestes habituels utilisés pour jouer de la trompette qui sont détectés par l'interface et permettent de contrôler le modèle (cf. figure 3.8) : force d'appui sur chacun des trois pistons, image de la pression dans la bouche, force d'appui des lèvres sur l'embouchure [Ver00]. A la différence d'une réalisation précédente de P. Pierrot et A. Terrier (violon MIDI, en 1997 popularisé plus tard par S. Goto sous le terme *SuperPolm*) l'idée est de ne pas condamner le jeu traditionnel acoustique de l'instrument (dans l'esprit de ce qui a été fait pour la flûte traversière au LMA par exemple [YV01]). L'intérêt est double : profiter de l'expertise du musicien pour la synthèse sonore, et donner au musicien la possibilité de dépasser les limites habituelles du jeu instrumental. Pour plusieurs raisons, ce dispositif n'a pu être évalué par des musiciens : une raison vient de la difficulté à établir les liens (les spécialistes parlent de *mapping* [WD04]) entre les paramètres mesurés et les paramètres de contrôle du modèle. Cependant, en y consacrant le temps nécessaire, un exemple récent sur les instruments à cordes montre que l'approche est pertinente, au moins pour construire des modèles de gestes aptes à reproduire des effets sonores typiques de l'instrument [DC07]. Des tentatives de contrôle temps réel du modèle à partir d'une partition viennent d'aboutir [DR09].

1. norme de transmissions de données entre appareils de musique électroniques

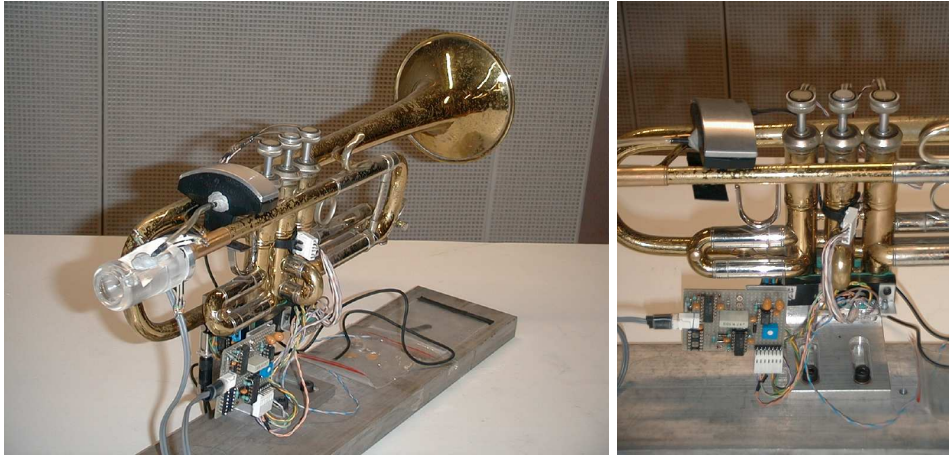


FIGURE 3.8 – Meta-trompette permettant de mesurer plusieurs gestes d’un trompettiste à des fins de contrôle d’un modèle physique [Ver00]

- Il peut s’agir aussi d’étudier, pour les comprendre, les gestes effectués par certains instrumentistes. C’est le cas pour les flûtistes Ouldémé dont nous avons parlé au paragraphe 3.4.2 : en plus d’un modèle physique, c’est l’interface la plus proche possible de l’instrument réel qui a dû être proposée, afin d’éviter de perturber les musiciennes (figure 3.7 en bas, [47]). Dans ce cas c’était les stratégies d’accord des cinq musiciennes de l’ensemble qui étaient étudiées, en partant de modèles physiques initialement désaccordés par les ethno-musicologues.

Problème inverse, estimation automatique des paramètres

Alors que le contrôle temps réel que nous venons d’évoquer permet d’instaurer une relation de type instrumentiste/instrument avec le modèle, d’autres stratégies de contrôle sont envisageables, au premier rang desquelles l’estimation automatique au cours du temps des paramètres de contrôle (ou commandes) du modèle. Il s’agit alors d’une approche “problème inverse” puisqu’on cherche à trouver, en fonction d’un résultat attendu (une note ou un effet sonore particuliers) les valeurs des commandes du modèle, ou l’évolution de ces commandes. Nous avons exploré plusieurs directions de recherche :

Approche “analytique” (appliquée à un modèle de trompette simplifié, pendant le stage de DEA de T.Hélie) : nous avons pu estimer les variations des paramètres relatifs au modèle de lèvre à une masse (fréquence de résonance et amortissement) en fonction d’un son joué par le modèle [36]. Il faut pour cela supposer que les gestes sont lentement variables par rapport aux variables acoustiques, sinon le problème est mal posé : une infinité de commandes différentes produisent le même son. Les résultats obtenus sont prometteurs, en particulier parce que la qualité de l’estimation n’est pas influencée par la nature du signal (attaque ou partie stationnaire du son). Cependant l’extension au cas d’un son joué par une vraie trompette pose des problèmes de robustesse propres à ce type de méthode. Thomas Hélie approfondit actuellement l’approche analytique et parvient à améliorer les problèmes de robustesse de l’inversion aux mauvaises conditions initiales ou à la présence de bruit. L’approche repose sur l’utilisation d’observateurs non linéaires [dNCH10].

Approche “base de données” : elle permet de fournir la solution à partir de combinaisons de paramètres enregistrées et stockées. Cette solution a été utilisée pour le paramétrage des modèles physiques de flûte Ouldémé déjà évoquées [46, 47]. La similarité du son cible et des sons générés à partir des combinaisons stockées dans la base de données se fait via des indices qui décrivent le spectre de la partie stationnaire du son : enveloppe et barycentre spectral.

Approche “optimisation” : variante de l’approche “base de données” où aucune combinaison de paramètre n’est stockée à l’avance. C’est un algorithme d’optimisation (nous avons choisi le recuit simulé [Ing89] pour son aptitude à éviter (souvent) les minima locaux) qui propose de nouvelles combinaisons, dont la pertinence est évaluée en comparant des descripteurs de timbre calculés à partir des sons correspondants. C’est l’approche que nous avons utilisée avec P. Tisserand pour optimiser les paramètres des modèles de cuivres proposés dans le logiciel *Brass*. L’optimisation de paramètres pour accorder l’instrument a été publiée dans [17] mais d’autres tentatives ont été réalisées avec une fonction de coût basée sur des descripteurs de timbre, en particulier lors du stage de L. Guénel. Le but était de se rapprocher du timbre de sons enregistrés. Une des difficultés est de disposer d’une fonction de coût pertinente : comment catégoriser et comparer deux sons du point de vue perceptif ?

Conclusion Le gros avantage de l’approche “analytique” est la possibilité intrinsèque d’estimer des commandes fixes ou évoluant dans le temps, alors que pour l’instant nous sommes limités à des commandes fixes pour les deux autres approches. Par contre la robustesse au bruit ou l’extension à l’estimation à partir d’instruments réels est problématique pour la première approche, au contraire des deux autres. Dans un futur proche, nous envisageons avec Ph. Guillemain et D. Ferrand d’adapter pour la synthèse sonore l’approche “commande répétitive” utilisée pour les asservissements de la bouche artificielle en cas de profil cible rapide (paragraphe 2.4.3). L’objectif est de profiter des qualités de robustesse de cette approche et de permettre de traiter le cas de commandes variant dans le temps.

3.5 Discussion : deux défis pour la synthèse sonore

On est passé en trente ans de modèles ultra-simplifiés qui mobilisaient pendant plusieurs jours les ressources d’un ordinateur PDP-15 pour obtenir une seconde de son [SS80] à une situation où la simulation en temps réel n’occupe plus qu’une fraction des ressources d’un ordinateur individuel. Aujourd’hui, à la différence d’il y a encore une dizaine d’années, le temps réel n’est plus un défi, il est devenu la règle. Quels sont alors les défis aujourd’hui pour la synthèse sonore par modèle physique ? Nous en évoquons deux : légitimer et banaliser son utilisation, par le musicien de home studio d’abord, et dans une problématique de facture instrumentale ensuite.

3.5.1 De bons candidats pour des applications musicales grand public ?

Les années 90 ont vu les premiers claviers haut de gamme proposer des modèles physiques de synthèse, suite aux travaux sur les guides d’onde de J.O. Smith [Smi92] : VL1 de Yamaha (et ses

déclinaisons) puis Prophecy de Korg. Coûtant plusieurs dizaines de milliers de francs, ces claviers monophoniques ne peuvent être considérés comme destinés au grand public, mais étaient plutôt des vitrines technologiques.

Pour toucher le grand public, la réduction du temps de calcul revient au premier plan mais avec des exigences bien plus élevées qu'en laboratoire : en effet, la plupart des musiciens disposent de moyens limités, typiquement un ordinateur unique sur lequel doivent fonctionner tous les programmes nécessaires : séquenceur, synthétiseurs, spatialisation, simulation d'amplificateurs, ... La course à la réduction du temps de calcul redevient d'actualité et les études s'attachant à minimiser le nombre d'opérations par seconde ont donc aussi des motivations très pratiques [Gui, dNCH10].

Mais d'autres raisons rendent difficiles le passage d'un modèle du laboratoire à l'application musicale : produire avec une synthèse sonore en temps réel, des résultats qui donnent l'illusion qu'un instrument acoustique est joué peut être difficile. Une phase de recherche plus ou moins empirique des valeurs adéquates des paramètres du modèle est pour l'instant indispensable. Les valeurs retenues sont celles qui donnent le résultat sonore le plus convaincant. Cette approche très pragmatique peut surprendre, et on pourrait s'attendre à des critères plus objectifs, mais aujourd'hui il n'en existe pas de pleinement satisfaisant. La question de la justesse en particulier est omniprésente : comment laisser à l'utilisateur l'accès aux paramètres de contrôle du modèle tout en garantissant la justesse du son résultant ? Avec un instrument acoustique, le musicien résout ce problème en modifiant plusieurs paramètres simultanément (comme on l'a vu au paragraphe 2.3 sur un transitoire d'attaque au saxophone alto).

Il est intéressant de noter que malgré tout, quelques applications commerciales ont été proposées sous forme de logiciels de synthèse sonore : TASSMAN (société Applied Acoustics Systems) et BRASS (société Arturia). L'application BRASS, dans le développement de laquelle j'ai été impliqué, propose à l'utilisateur de jouer d'un instrument virtuel (trompette, trombone, et saxophone), et ce simplement à partir du clavier. Des variations de paramètres, ou modèles de gestes, ont donc été enregistrées et sont déclenchées en fonction du jeu du musicien au clavier pour commander le modèle avec des variations de paramètres ad-hoc pour reproduire des phrasés typiques de l'instrument considéré tout en minimisant (sans totalement les résoudre) les problèmes de justesse. Des exemples sonores joués en temps réel sont disponibles à l'adresse <http://www.arturia.com/en/brass/closeup.php> ou <http://www.arturia.com/en/brass/samples.php> [17].

3.5.2 De bons candidats pour une aide à la facture ?

Que peut-on espérer dans cette perspective ? Le musicien essayeur reste et restera le juge de paix en bout de chaîne. Mais le modèle physique n'a-t-il pas une place à trouver pour guider le facteur et rendre certaines démarche exploratoires moins hasardeuses ? Depuis de nombreuses années déjà, des logiciels de calcul d'impédance sont utilisés par certains facteurs. Par exemple, Ph. Bolton, grâce au logiciel RESONANS (calcul d'impédance, LAUM/Ircam), réduit considérablement le nombre d'essais à effectuer lors de la conception d'un nouveau corps de flûte à bec. Un modèle complet d'instrument offrirait en plus des informations sur la fréquence de jeu, le timbre, les différents régimes d'oscillation ... Dans cet esprit, dans [GGA95], Gazengel et al. ont montré qu'on pouvait par simulation retrouver des différences de timbre liées aux doigtés de gorge de

la clarinette. De même Petiot et al. [PaJG10] ont montré qu'à des différences géométriques de branches de trompettes pouvaient correspondre des différences significatives dans le timbre de sons simulés. Cependant, banaliser l'utilisation des modèles de synthèse sonore par le facteur ne nous semble pas réaliste aujourd'hui, et les verrous sont de deux ordres. Premier verrou, les gestes du musicien sont encore trop mal connus (les études telles que celles présentées au paragraphe 2.3 sont à multiplier), or le musicien s'adapte en permanence : le bon musicien sait sublimer le mauvais instrument. Le second verrou est lié à l'estimation des paramètres d'un modèle, dont nous avons souligné dans le chapitre 2 la grande difficulté. Un seul exemple pour illustrer l'importance de ce problème dans un contexte d'aide à la facture : M. van Walstijn et F. Avanzini [vWA07] ont montré pour un modèle de clarinette que suivant le choix fait pour la raideur d'anche (constante ou variant en fonction du placage de l'anche sur le bec), les évolutions de la fréquence prévues par le modèle étaient de sens opposé !

3.6 Perspectives

On peut inclure ici, au titre de perspectives, les idées discutées au paragraphe 3.5. Sont ajoutées quelques idées supplémentaires, toujours en respectant un ordre qui me paraît correspondre au terme associé à ces recherches.

La synthèse sonore pour aider à l'interprétation de mesures (coll. Ph. Guillemain)

Suite au travail présenté au paragraphe 2.3 sur l'influence du conduit vocal dans le jeu du saxophone, nous pensons que l'action principale du musicien sur son conduit vocal consiste à en modifier les fréquences de résonance (plutôt que les facteurs de qualités des résonances). Mais n'ayant pas expérimentalement accès directement à l'impédance du conduit vocal à chaque instant, il est difficile d'être catégorique. A partir des modèles développés par Guillemain [Gui07], nous souhaitons reproduire les situations correspondant à nos hypothèses et comparer le résultat de simulations à la mesure in vivo. Nous n'apporterons pas de preuve par cette méthode, mais renforcerons le faisceau des présomptions. Ce sera aussi l'occasion du strict point de vue de la synthèse, d'élargir la palette d'effets offerts.

Propagation non linéaire et algorithme temps réel (coll. T. Hélie)

Nous travaillons actuellement au développement d'un algorithme pour tirer au mieux parti de la formulation présentée au paragraphe 3.3, et proposer une exploitation dans les algorithmes de synthèse temps réel. Il est également possible de préciser les conditions pour lesquelles la solution sera exacte (pas d'approximation numérique). Enfin, la question du repliement spectral sera aussi étudiée, car l'oreille peut y être très sensible.

Propagation non linéaire en guide d'onde : POM/MNL (coll. S. Bellizzi et B. Coche-

lin) C'est un cas intéressant sur lequel l'analyse en POM et MNL peut éclairer le physicien, en particulier par la mise en évidence des couplages entre différents modes acoustiques. Il s'agira de se concentrer sur l'étude de la propagation acoustique non linéaire uniquement, donc le résonateur sera étudié en régime forcé (pas d'auto-oscillation). On pourra aborder le problème à partir de modèles, mais au moins pour les POM également expérimentalement en mesurant la pression

en divers points du guide d'onde. Une application à la synthèse sonore pourra être envisagée : peut-on, proposer un modèle de synthèse de cuivre qui produit une approximation du phénomène de cuivrage tout en reposant sur l'utilisation d'une structure de résonateur linéaire (POM) donc efficacement calculable ?

Chapitre 4

Régimes d'oscillation, bifurcations

Sommaire

4.1	Introduction	65
4.2	Analyse des conditions d'émergence du son : différents points de vue	66
4.2.1	Approche automatique : systèmes bouclés et schémas blocs	67
4.2.2	Approche systèmes dynamiques : étude paramétrique des seuils	70
4.2.3	Approche mathématiques appliquées : spectre des instruments à anche au voisinage du seuil	72
4.3	Inspecter les caractéristiques de régimes établis	74
4.3.1	Équilibrage harmonique numérique : régime périodique et stabilité	74
4.3.2	Approche par perturbation du mouvement de Helmholtz	75
4.3.3	Régimes non nécessairement périodiques : du silence au chaos	77
4.4	Diagrammes de bifurcation	78
4.4.1	Introduction : notion de branche solution et de continuation	80
4.4.2	MAN et équilibrage harmonique purement fréquentiel	81
4.4.3	Alternative à l'équilibrage harmonique : MAN et continuation d'orbites temporelles	84
4.4.4	Cas particulier de continuation : la continuation de bifurcations	86
4.5	Perspectives	87

4.1 Introduction

Nous abordons ici la question de l'analyse des comportements des modèles. En tant que systèmes dynamiques non linéaires, les modèles des instruments de musique à vent nécessitent des études spécifiques pour connaître leurs possibilités (quand la finalité est l'analyse) et mieux les exploiter (quand la finalité est la synthèse).

Motivations liées à l'analyse du fonctionnement des instruments : les liens entre les paramètres géométriques ou mécaniques des instruments, fixés par le facteur, les paramètres de

contrôle ajustés par les musiciens, et les paramètres des sons produits par les instruments sont difficiles à analyser. Même les modèles à faible nombre de degrés de liberté considérés habituellement en acoustique musicale ne livrent pas facilement ces informations qui sont pourtant à la base des interrogations des musiciens et des facteurs. C'est par cette analyse des comportements que le chercheur peut éclairer certaines techniques instrumentales, en suggérer d'autres, ou espérer compléter sur certains points le savoir-faire du facteur.

Motivations liées à la synthèse sonore : un des objectifs de la synthèse par modèle physique est de fournir aux musiciens de véritables instruments de musique numériques. Si un instrumentiste consacre plusieurs années à apprendre comment contrôler son instrument (pour « éviter le chaos », [Ker97]), les possibilités offertes par un modèle physique doivent au contraire être accessibles rapidement à l'utilisateur. Une possibilité, pour éviter l'exploration par tâtonnements qui est l'usage aujourd'hui, consisterait à délivrer au musicien une information *a priori* sur les comportements du modèle en fonction des valeurs des paramètres de contrôle. Cela suppose une étude préalable du modèle physique et de ses bifurcations afin d'obtenir des résultats sur la diversité des solutions et leurs caractéristiques.

Les motivations en lien avec les applications ont été mises en avant dans cette introduction pour préciser le contexte des recherches effectuées. Pour autant, le moteur principal reste le désir de compréhension des phénomènes observés et de découverte des possibilités des instruments existants. La première question à étudier est celle des conditions d'émergence du son (paragraphe 4.2). L'intérêt n'est pas tant d'identifier la nature du phénomène (le système présente simplement une bifurcation de Hopf) que de prédire les relations entre paramètres qui vont provoquer cette bifurcation, ainsi que les caractéristiques de l'oscillation émergente, donc du son (fréquence, amplitude et contenu spectral au voisinage du seuil). Pour obtenir le même type d'information pour des points de fonctionnement arbitrairement loins du seuil d'oscillation, des méthodes numériques sont souvent nécessaires (paragraphe 4.3) : l'équilibrage harmonique dans sa version adaptée aux systèmes autonomes (§4.3.1) ou une technique de perturbation pour tenir compte de la forme particulière des signaux temporels dans les instruments à anche (§4.3.2). Lorsque les régimes ne sont pas périodiques, il est intéressant de les caractériser (§4.3.3) en utilisant les techniques classiques d'analyse des séries chronologiques. Enfin, s'intéresser à des branches solutions (et plus seulement à des points solutions) permet de construire des diagrammes de bifurcation (paragraphe 4.4) et d'accéder aux évolutions continues des solutions le long d'une branche, mais aussi à leurs changements qualitatifs aux points de bifurcations. C'est donc un cadre bien adapté à la représentation des différents régimes possibles mais aussi à l'analyse des conditions (relations entre paramètres) qui vont favoriser l'émergence d'un régime particulier.

4.2 Analyse des conditions d'émergence du son : différents points de vue

La production d'une note correspond à une instabilité de type flottement, induite par la présence d'un écoulement, dont de nombreux autres exemples sont recensés dans la littérature

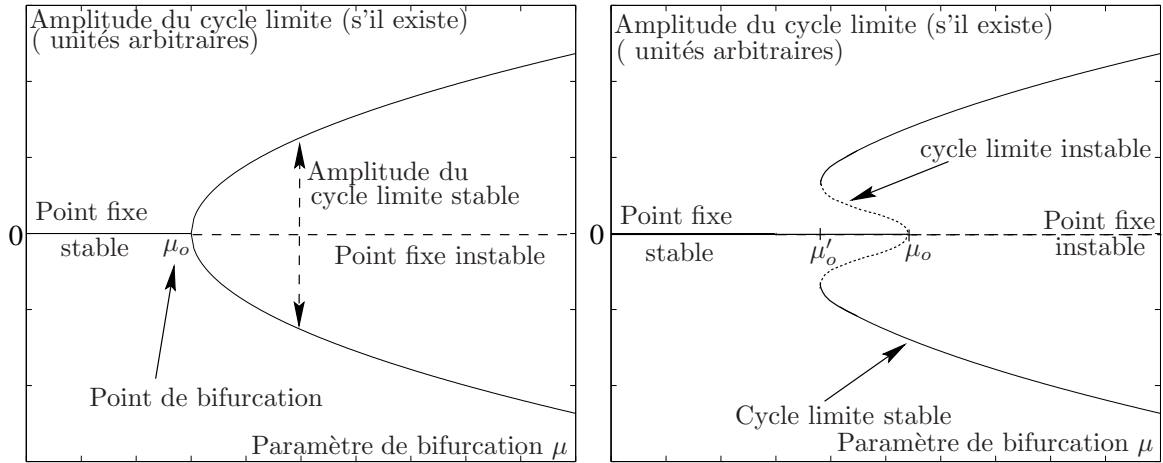


FIGURE 4.1 – Schéma général de la bifurcation de Hopf directe (à gauche), et inverse (à droite). D'après [BPV88].

([Ble01] par exemple). L'apparition d'un régime périodique lors de la perte de stabilité d'une solution stationnaire correspond à une bifurcation de Hopf, qui peut être directe ou inverse (cf. figure 4.1). Helmholtz [Hel77] et Rayleigh [Ray77] furent parmi les premiers à étudier les phénomènes physiques responsables de l'auto-oscillation dans les instruments de musique. Ils ont décrit la naissance d'une oscillation en termes de synchronisation entre deux systèmes oscillants et ont expliqué la persistance d'une oscillation par l'équilibre des échanges d'énergie entre un exciteur et un résonateur. Plus tard, de nombreux auteurs comme [Bac63, WB74, Fle79, EB82], ont étudié la dynamique de modèles simples d'instruments à vent. Dans le cadre de la théorie des systèmes dynamiques linéaires, ils ont montré qu'en-dessous d'un certain seuil de pression dans la bouche, l'instrument ne peut avoir de solution oscillante persistante. Des confrontations du seuil d'oscillation avec l'expérience ont été reportées : par exemple pour les anches [WB74, TFL00], la voix [RPvHaILAH07], les cuivres [CGC00].

Au delà du seuil d'oscillation, on peut s'intéresser aux solutions auto-oscillantes (sous l'hypothèse de petites oscillations) : [Wor71, Kee92, KOG00, DGKO05] pour les instruments à anche, [EB82] pour les cuivres et [STY87] pour des modèles de clarinette, de basson et d'euphonium. Les bifurcations d'un modèle de base à deux équations où l'anche est supposée sans masse ont été étudiées dans [MSW83] et [GGL96]. La bifurcation de Hopf d'un modèle de cuivre est étudiée dans [3].

4.2.1 Approche automatique : systèmes bouclés et schémas blocs

Le seuil d'oscillation : critère de Barkhausen

Collaborateurs : D. Ferrand, F. Silva (thèse)

Le fonctionnement des instruments à vent se représente par un système bouclé (cf. figure 1.1 p12). On peut alors utiliser le critère de Nyquist, ou critère de Barkhausen en théorie des oscillateurs, qui permet d'étudier la stabilité de la solution d'équilibre en boucle fermée en étudiant le gain linéarisé en boucle ouverte. L'instabilité apparaît lorsque, par variation d'un paramètre

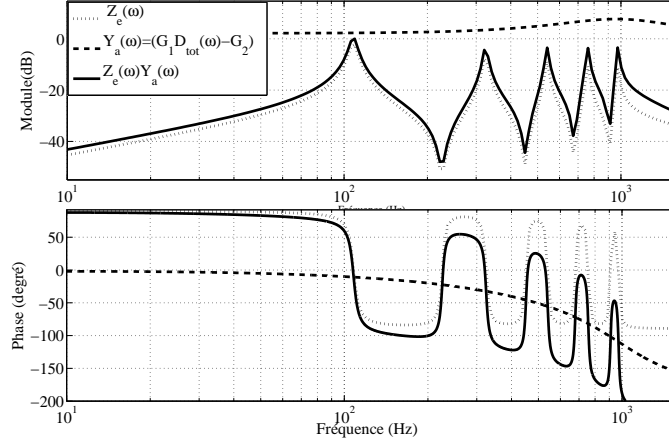


FIGURE 4.2 – Diagramme de Bode pour illustrer le critère de Barkhausen, sur un modèle particulier de clarinette. Le trait pointillé représente la fonction de transfert acoustique du résonateur (son impédance d'entrée), les tirets la fonction de transfert aéro-élastique de l'excitateur linéarisé, le trait plein le gain en boucle ouverte du modèle (produit des deux fonctions de transfert). L'instabilité de la solution stationnaire se manifeste lorsque pour une fréquence, le gain en boucle ouverte voit son module atteindre 1 et sa phase 0° . Cette figure, tracée pour $p_{bouche} = 3.6 \text{ kPa}$ correspond donc exactement au seuil d'instabilité puisque les deux conditions sont vérifiées à la fréquence $f = 107.4 \text{ Hz}$. Figure extraite de [64].

d'intérêt λ , le gain en boucle ouverte (complexe) devient égal à l'unité pour une fréquence. Cette égalité correspond donc à une condition sur le module ($|| = 1$) et une sur la phase ($\varphi = 0$). Formellement, cela revient à chercher la valeur de λ pour laquelle les valeurs propres du jacobien du système défini par $\dot{X} = f(X, \lambda)$ deviennent imaginaires (la partie imaginaire correspondant à la fréquence de la solution émergente).

Une variante consiste à tracer le gain en boucle ouverte pour une valeur du paramètre λ , ce qui permet d'apprécier la stabilité de la solution stationnaire, de visualiser les différentes fréquences pour lesquelles la marge de stabilité est la plus faible et qui peuvent déstabiliser le système par variation de λ . Cela permet une vision plus globale du système. Par exemple, dans le cas de la clarinette (dont le fonctionnement peut être représenté par le schéma bloc déjà présenté en figure 2.13 p26), la figure 4.2 illustre un cas où le seuil d'instabilité de la solution d'équilibre est juste atteint car les deux conditions sur le module et la phase sont vérifiées en $f = 107.4 \text{ Hz}$. La solution émergente correspond au premier registre de l'instrument, mais on voit également que d'autres pics correspondant aux modes supérieurs de l'instrument, ne sont pas loin en module de la condition d'instabilité. Pour autant, l'examen plus précis de la figure révèle que plus on monte en fréquence plus les fréquences correspondant à un maximum du module et à un passage par 0 de la phase sont différentes. Ceci est dû à l'anche qui contribue progressivement à la déviation de la phase (courbe en tirets) quand on se rapproche de sa fréquence de résonance. Ce phénomène explique pourquoi les seuils d'oscillation mesurés sur une vraie clarinette lorsque la longueur du résonateur diminue (différents doigtés) apparaissent pour des p_{bouche} de plus en plus élevées quand la fréquence émergente se rapproche de la fréquence de résonance de l'anche. Au contraire, pour les longueurs de résonateur plus importantes (notes graves, fréquence émergente éloignée de la fréquence de résonance d'anche), la diminution de la longueur du résonateur s'accompagne d'une

diminution de p_{bouche} au seuil (l'explication étant alors la diminution des pertes acoustiques visco-thermiques qui sont proportionnelles à la longueur du résonateur). Ces deux effets sont visibles sur les mesures que nous avons effectuées (figure 2.14 p27).

On peut continuer à tirer profit de la structure en systèmes bouclés en utilisant comme ci-dessous une méthode plus formelle qui donne accès à des résultats sur l'existence et l'unicité de la solution oscillante, le type de bifurcation de Hopf et les caractéristiques de l'oscillation dans un voisinage du seuil.

Le seuil d'oscillation et son voisinage : théorème de Hopf

Collaborateur : X. Rodet (Ircam)

Soit un système dynamique non linéaire autonome contrôlé par un paramètre λ (λ peut en fait être un vecteur de paramètres). Le théorème de Hopf [Hop42] est une méthode pour étudier l'établissement ou la disparition d'une solution oscillante quand la stabilité du point fixe change par modification de λ . La preuve complète de ce théorème en dimension infinie peut être trouvée dans [CR78]. Pour les représentations sous forme de systèmes bouclés, [All77] et [MC79] ont développé une forme particulièrement adaptée du théorème de Hopf où tout élément linéaire (incluant un retard ou pas) est représenté par sa fonction de transfert. Pour que la version fréquentielle du théorème de Hopf soit applicable, le système dynamique doit s'exprimer par une fonction non linéaire f , de régularité C^4 et instantanée, bouclée sur une partie linéaire incluant éventuellement un ou plusieurs retards.

Ce théorème permet de prouver l'existence d'une solution périodique, son unicité et sa stabilité. De plus, au voisinage de la bifurcation, des estimations de la fréquence et de l'amplitude sont obtenues, ainsi que l'ordre de l'erreur commise. Mees et Chua [MC79] ont prouvé que le couple solution pulsation/amplitude de la solution périodique correspondait à la solution d'un équilibre harmonique de second ordre dans un voisinage du seuil.

Modèle retenu : semblable à celui décrit en annexe 7.2 pour lequel le résonateur, cylindrique, est décrit comme un système à retard (correspondant au temps d'aller-retour d'une perturbation acoustique dans le tuyau). L'approche fréquentielle retenue est alors particulièrement avantageuse. En effet la présence d'un retard dans un système d'équations correspond à une matrice d'état de dimension infinie dans le domaine temporel [DvGLW95]. Au contraire, dans le domaine fréquentiel, le système étudié conduit ici à des matrices de dimension 2.

Résultats : Nous avons montré dans [3] que cette méthode permettait d'accéder à des résultats dont la confrontation avec des résultats de simulation s'avérait excellente dans un voisinage du seuil d'oscillation. En pratique cependant, l'accord qualitatif n'est observé que sur une gamme de quelques Pascal (résultat identique à ce que nous avons obtenu quelques années plus tard pour l'étude des seuils des instruments à anche [14]). Dans les configurations testées, la naissance de l'oscillation par augmentation de la pression dans la bouche se fait par une bifurcation de Hopf directe. Ce résultat permet d'affirmer que l'on peut jouer du modèle physique pianissimo, soit en augmentant la pression d'alimentation depuis zéro, soit en diminuant la pression depuis une valeur où la note est établie. Ce comportement semble en accord avec celui d'un trompette réelle (même si cela demande à être vérifié sur bouche artificielle), ce qui n'est pas le cas de tous les

instruments de musique : Grand et al. [GGL96] par exemple ont montré que pour des notes graves, il est impossible de jouer pianissimo avec un saxophone car la bifurcation de Hopf est inverse : lorsque la pression d'alimentation augmente depuis zéro, il existe un seuil pour lequel la réponse du système saute du point fixe stable (pas de son) à un cycle limite stable d'amplitude non nulle (note établie). Une fois la note établie, il est possible toutefois (toujours d'après [GGL96]) de jouer moins fort en diminuant la pression d'alimentation.

Conclusion : Grâce à cette approche, on peut garantir l'existence, et l'unicité de la solution dans un voisinage de la bifurcation. De plus, cette méthode est intéressante car l'approche graphique ajoute une dimension pédagogique. Par contre, comme l'obtention du couple pulsation/amplitude passe par une mesure graphique, l'approche est difficilement adaptée à une étude systématique de l'influence d'un paramètre, comme cela est fait au paragraphe suivant.

4.2.2 Approche systèmes dynamiques : étude paramétrique des seuils

Collaborateurs : F. Silva (thèse), J. Kergomard, J. Gilbert

Au contraire de la méthode précédente, l'approche développée durant la thèse de F. Silva se focalise sur les seuils d'instabilité du régime statique (analyse linéaire de stabilité). Il s'agissait d'identifier les phénomènes prépondérants dans l'émergence des auto-oscillations de la colonne d'air et de l'anche et l'influence des différents paramètres du modèle [11]. Le modèle retenu est le modèle de clarinette à trois équations (annexe 7.1) auquel on ajoute le débit pulsé correspondant à l'air déplacé par le mouvement de l'anche (qu'on appelle débit d'anche).

L'analyse linéaire de stabilité conduit à résoudre l'équation suivante, dont les solutions p_b et ω correspondent respectivement à la pression dans la bouche nécessaire provoquant la perte de stabilité de la solution statique, et à la pulsation de la solution périodique émergente associée :

$$\underbrace{Z_e(\omega)^{-1}}_{\substack{\text{Admittance} \\ \text{d'entrée du} \\ \text{résonateur}}} + \underbrace{\frac{j\omega\Delta l_a}{cZ_c}D(\omega)}_{\substack{\text{Admittance due au} \\ \text{débit d'anche}}} = \underbrace{\frac{1}{K}\sqrt{\frac{2p_b}{\rho}}\left(D(\omega) - \frac{Kh_0 - p_b}{2p_b}\right)}_{\substack{\text{Linéarisation du débit fourni} \\ \text{par l'excitateur}}} \quad (4.1)$$

Cette équation fait apparaître tous les paramètres du modèle. $D(\omega)$ est la fonction de transfert entre le déplacement de l'anche et la différence de pression de part et d'autre de l'anche et représente donc l'influence de la dynamique de l'anche. Ce travail [11] a permis de revisiter les travaux pionniers de Wilson & Beavers [WB74], qui déjà soulignaient l'importance de l'amortissement sur la sélection du mode acoustique sur lequel se faisait le verrouillage de l'auto-oscillation (des résultats typiques sont présentés en figure 4.3) : lorsque l'anche est suffisamment amortie, la fréquence de l'auto-oscillation est proche de celle du premier mode acoustique, tandis que pour une anche très peu amortie (à droite) la fréquence de l'auto-oscillation est plus contrôlée par l'anche et proche de sa résonance mécanique. Le premier cas correspond au mode de fonctionnement de la clarinette sur son premier registre (l'amortissement nécessaire étant apporté par la lèvre du musicien), tandis que le second cas traduit le fonctionnement des tuyaux d'orgue à anche (le réglage de la fréquence du son se faisant en déplaçant la rasette qui modifie la longueur vibrante de l'anche métallique).

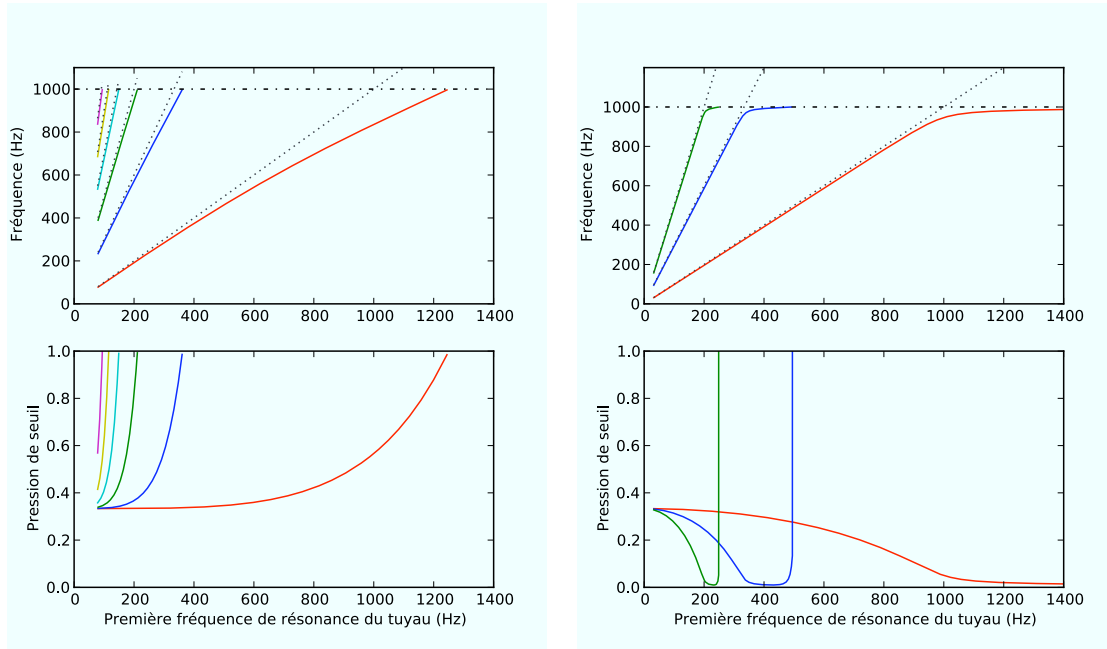


FIGURE 4.3 – Résultats typiques de seuils d'oscillation (pression dans la bouche adimensionnée et fréquence) pour le modèle d'anche en dedans (ex : clarinette) en fonction de la fréquence du premier mode acoustique, lorsque l'amortissement apporté à l'anche est important (à gauche) ou faible (à droite). Le résonateur est un cylindre. Extraits de la soutenance de thèse de F. Silva, [Sil09].

Par rapport au travail de Wilson & Beavers : leurs calculs numériques sont faux dans la région la plus critique du problème, là où la fréquence de jeu s'approche de la résonance d'anche. Mais la correction de ce problème n'améliore pas particulièrement la concordance avec les résultats expérimentaux présentés dans leur article. De plus, une analyse sur l'influence de nombreux raffinements dans la modélisation de la clarinette a été effectuée : en particulier pertes plus réalistes dans le résonateur acoustique, et débit secondaire produit par le mouvement de l'anche (améliore largement les résultats pour les fréquences de jeu mais pas pour les seuils de pression).

Les calculs au-delà du seuil permettent de prédire la rapidité du transitoire en fonction des différents paramètres, en cherchant les solutions complexes de l'équation caractéristique.

Nous avons mené des travaux comparables pour les lèvres vibrantes (anches dites en-dehors, [60]). On retrouve des résultats qu'on peut mettre directement en relation avec le comportement de l'instrument réel (figure 4.4) :

- sauts de la fréquence par variation continue de la fréquence de résonance des lèvres f_r : correspond aux changements de registres (figure 4.4 en haut).
- autour des sauts de la fréquence de jeu, on observe des remontées significatives des seuils en pression (figure 4.4 en bas).
- une expression analytique, de la plage de fréquence de jeu possible a été obtenue et est représentée par les deux droites obliques (figure 4.4 en haut) : entre f_r et $\sqrt{3}f_r$ dans le cas sans perte, l'amortissement réduisant cette plage.

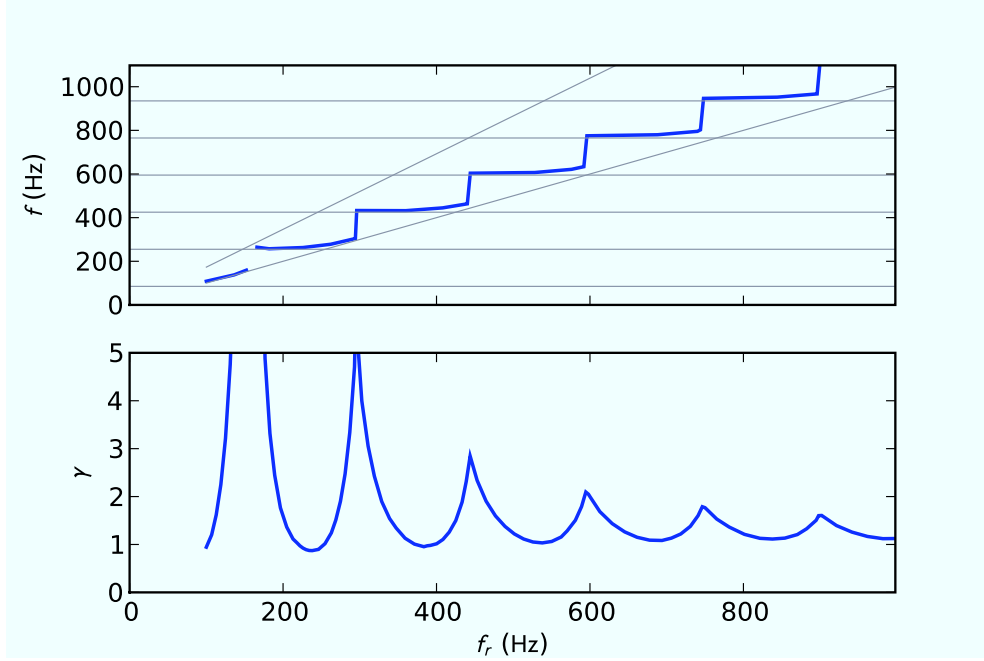


FIGURE 4.4 – Résultat typique pour les seuils d'oscillation (pression dans la bouche adimensionnée et fréquence) pour le modèle d'anche en dehors (ex : lèvres) en fonction de la fréquence de résonance des lèvres f_r . Le résonateur est un cylindre. Figure extraite de [60].

- Sur la figure 4.4 en haut, la compétition entre les fréquences des modes acoustiques du résonateur (représentées par des lignes horizontales) et la fréquence du mode mécanique des lèvres (la plus basse des deux lignes obliques) est clairement visible : la fréquence de jeu est proche de celle des modes acoustiques mais il est possible de tirer cette fréquence vers le haut en faisant varier f_r . Il est également remarquable que la plage de variation de f au delà de la fréquence du mode correspondant est d'autant plus importante que l'on est en basse fréquence.

4.2.3 Approche mathématiques appliquées : spectre des instruments à anche au voisinage du seuil

Collaborateurs : B. Ricaud (post-doc), Ph. Guillemain, J. Kergomard, F. Silva (thèse)

Pour étudier les solutions périodiques d'un système, l'équilibrage harmonique est une approche classique, popularisée par J. Gilbert et al. dans le cas des instruments à vent [GKN89]. L'idée générale est de décomposer chaque variable en sa série de Fourier (tronquée à N harmoniques) :

$$p(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} P_n e^{jn\omega t}, \quad P_n \in \mathbb{C}, \quad P_n = \bar{P}_{-n} \quad (4.2)$$

On passe alors d'une formulation d'un système différentiel à un système algébrique dont les inconnues sont les coefficients de Fourier P_n et la pulsation ω . Il existe de nombreuses approches et variantes pour résoudre numériquement ce type de problème, et nous en verrons de nouveaux

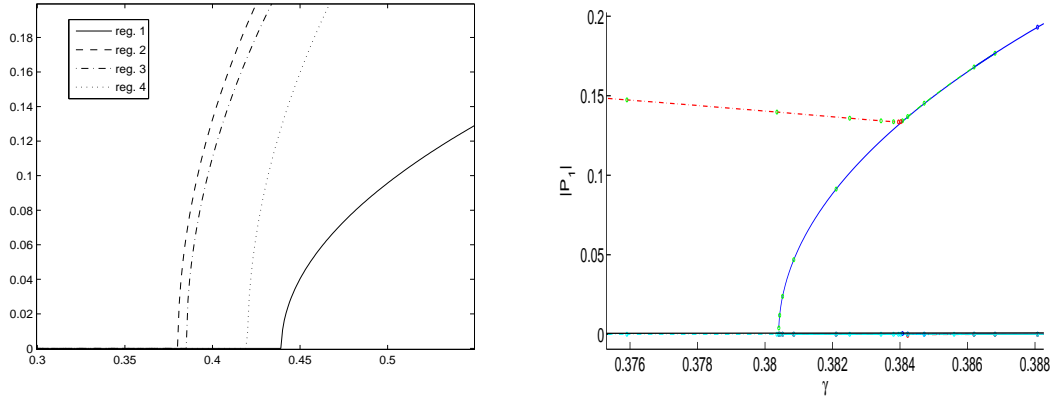


FIGURE 4.5 – **A gauche** : modèle de saxophone : amplitude du premier harmonique $|P_1|$ en fonction de la pression dans la bouche pour différents registres. Figure extraite de [14]. **A droite** : calculs effectués avec MANLAB (cf. paragraphe 4.4.2) zoom autour de la bifurcation sur le second registre révélant l'émergence d'une nouvelle branche peu après le seuil (avec une période double).

exemples aux paragraphes 4.3.1 et 4.4.2. Mais dans ce travail, effectué durant le post-doc de B. Ricaud [14], c'est une approche semi-analytique qui a été développée. Ceci a été possible en exploitant la structure particulière des équations du modèle des instruments à anche : hors de la zone d'anche battante le modèle d'écoulement se met sous forme quadratique, et on peut donc écrire analytiquement assez facilement les séries de Fourier. De plus, en se plaçant dans l'hypothèse "petites oscillations", des résultats nouveaux ont été obtenus (mais ne sont donc valides que dans un voisinage du seuil) :

- les conditions d'oscillation sont exprimées de manière analytique en fonction des paramètres du modèle, et ce même en tenant compte de la dynamique de l'anche.
- La nature de la bifurcation (directe ou inverse) est déterminée.
- Les caractéristiques de la branche émergente sont calculées (évolutions de ω et P_q en fonction de γ).
- Enfin, la preuve d'une conjecture formulée il y a une trentaine d'années et connue sous le nom de "loi de Worman" a été obtenue par B. Ricaud [Ric10]. La loi de Worman précise les relations entre les différentes composantes spectrales du régime établi.

La figure 4.5 (à gauche) présente par exemple l'évolution de l'amplitude du premier harmonique de la pression dans le bec d'un saxophone pour différents registres en fonction de la pression dans la bouche adimensionnée.

Les résultats ont été confrontés à une méthode numérique de continuation (détaillée aux paragraphes 4.4.1 et 4.4.2) pour évaluer le domaine de validité des approximations. Il se révèle être très étroit pour les cas testés (un voisinage de quelques Pascal autour de la pression dans la bouche critique correspondant au point de bifurcation). Tant que de nouvelles bifurcations n'apparaissent pas, l'accord avec les méthodes numériques reste qualitativement bon. Cependant de telles bifurcations peuvent se produire près du seuil d'oscillation. Par exemple en figure 4.5 à droite, on observe autour de $\gamma = 0.384$ l'émergence d'une branche avec une période double.

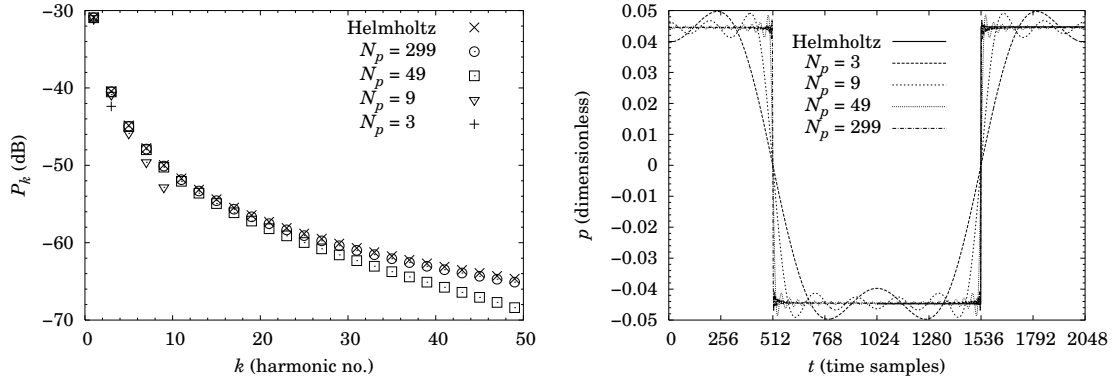


FIGURE 4.6 – Exemple de validation d'un calcul d'équilibrage harmonique réalisé par le logiciel Harmbal, par comparaison avec une solution analytique, dite de Helmholtz. Le nombre d'harmoniques utilisé N_p vaut successivement 3, 9, 49, and 299. L'image de gauche présente les résultats dans le domaine fréquentiel, celle de droite dans le domaine temporel. Extrait de [7].

4.3 Inspecter les caractéristiques de régimes établis

Lorsque la solution que l'on souhaite caractériser n'est pas proche du seuil d'oscillation, les méthodes présentées au paragraphe précédent ne sont pas utilisables. Suivant la nature de la solution, on utilise alors l'équilibrage harmonique dans sa version numérique (pour les solutions périodiques, paragraphe 4.3.1), une perturbation du mouvement de Helmholtz (paragraphe 4.3.2) ou l'analyse des séries chronologiques correspondant aux solutions produites par simulation directe (pour des solutions éventuellement non périodiques, paragraphe 4.3.3).

4.3.1 Equilibrage harmonique numérique : régime périodique et stabilité

Collaborateurs : S. Farner (post-doc), J. Kergomard, A. Lizée-Deblevid (thèse)

Logiciel Harmbal :

Le post-doctorat de S. Farner a été l'occasion de systématiser la recherche des solutions périodiques de toute une classe de modèles (ceux qui se ramènent à deux fonctions de transferts linéaires couplées par une fonction non linéaire instantanée). La technique de l'équilibrage harmonique a été mise en oeuvre grâce à un processus itératif. A chaque itération, on cherche à satisfaire le couplage imposé par la physique entre l'excitateur et le résonateur. L'approche est de type AFT (Alternating Frequency Time) c'est à dire que les calculs relatifs aux parties linéaires du modèle sont effectués dans le domaine fréquentiel, les termes non linéaires étant évalués dans le domaine temporel. Les aller-retour entre les domaines fréquentiels et temporels se font par des FFT et des FFT^{-1} ([FL87], approche utilisée pour la première fois pour les instruments à vent par J. Gilbert et al., [GKN89]). Par rapport au cas des systèmes forcés, la recherche de solutions périodiques pour les systèmes autonomes présente une spécificité puisque la période est inconnue : il y a donc une inconnue de plus. Traditionnellement, afin de conserver un système avec autant d'équations que d'inconnues, on ajoute une équation qui fixe la phase de la solution cherchée.

Le logiciel HARMBAL a été écrit et est distribué comme logiciel libre, sous licence CeCILL [81].

Les résultats ont été validés dans plusieurs situations [FFK04], [7], par comparaison à des résultats analytiques (clarinette sans pertes, saxophone sans pertes), ou par comparaison à des simulations temporelles (cas avec pertes). En particulier nous présentons en figure 4.6 une vérification de la convergence lorsque le nombre d’harmoniques augmente, de la solution de l’équilibrage harmonique vers la solution analytique, connue dans ce cas particulier (solution en signaux carrés, dite de Helmholtz, pour une clarinette à résonateur cylindrique sans pertes). Ce cas est particulièrement intéressant car le système est non régulier (anche battante) et les théorèmes habituels qui garantissent la convergence ne sont pas applicables [Ura65].

A ce jour le logiciel a été téléchargé une centaine de fois, et fait surprenant, majoritairement par des personnes hors de la communauté d’acoustique musicale à laquelle il était originellement destiné.

Stabilité des solutions

L’équilibrage harmonique donne accès à des solutions stables ou pas mais sans indication sur leur nature. Cette question est importante puisqu’elle détermine s’il est possible de rencontrer la solution étudiée soit expérimentalement soit lors de simulations numériques temporelles. Dans la littérature la méthode classique pour déterminer la stabilité d’une solution consiste à calculer les multiplicateurs de Floquet qui lui sont associés, en repassant dans le domaine temporel et donc de manière complètement déconnectée du calcul de la solution. Cette méthode, souvent lourde en temps de calcul, s’accompagne aussi de difficultés numériques [CLG98]. Au contraire, nous avons développé une méthode qui permet de réutiliser les calculs intermédiaires effectués lors de la recherche de la solution par équilibrage harmonique, dans un esprit proche de ce qui est fait sur les systèmes forcés par Von Groll et Ewins [vGE01] ou pour les instruments à vent par Gilbert et Goncalves [Gon01]. Reposant sur une technique de perturbation, le point clé de la méthode consiste à réécrire en fréquentiel, de manière ad-hoc, les équations différentielles satisfaites par la perturbation. Le problème de la stabilité des solutions se ramène alors à la recherche de valeurs propres d’une matrice qui se déduit facilement du processus de recherche de solution par équilibrage harmonique.

La méthode est validée sur des cas d’école (oscillateur de Duffing forcé, de Van der Pol auto-oscillant, [55]), mais n’a pas encore été incluse dans HARMBAL.

4.3.2 Approche par perturbation du mouvement de Helmholtz

Collaborateurs : D. Divoir (stage), J. Kergomard

Les solutions temporelles des modèles d’instrument à anche sont souvent proches d’un signal à deux états. Dans ces cas là, des difficultés de convergence de l’équilibrage harmonique nous ont amenés à développer une approche alternative : en effet, lorsque la solution attendue est proche d’un signal carré (ou rectangulaire), de nombreux termes sont nécessaires dans les séries trigonométriques pour approcher le profil temporel. L’alternative que nous avons explorée est d’adopter une approche de perturbation du signal carré (ou rectangulaire), qui correspond à la solution sans perte (dite de Helmholtz). En nous restreignant au cas de la clarinette pour valider

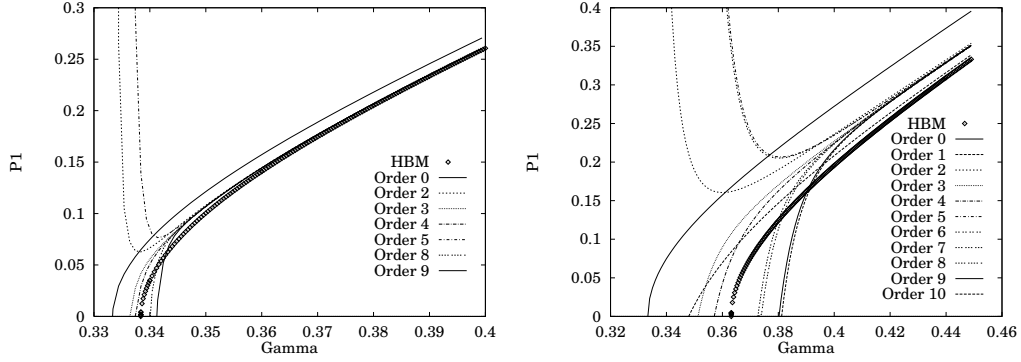


FIGURE 4.7 – Premier harmonique de la pression en fonction de γ (p_{bouche} adimensionnée), pour différents ordres de perturbation, et solution de l'équilibrage harmonique (50 harmoniques); à gauche : $\eta = 0.002$, à droite : $\eta = 0.02$. Figure extraite de [49].

l'approche, nous avons écrit la solution cherchée $p(t)$ comme une somme de termes :

$$p(t) = p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + \dots \quad (4.3)$$

où p_0 est le mouvement de Helmholtz (signal carré), et p_n un terme perturbateur d'ordre n en η , le terme de pertes dans le résonateur. La fréquence de l'oscillation est également calculée par perturbation à partir du cas sans perte. Pour cela, une équation supplémentaire est nécessaire et nous suggérons dans [49] l'utilisation de la méthode de la puissance réactive de X. Boutillon [BG96]. Le modèle retenu est celui à deux équations en annexe 7.1. avec un résonateur cylindrique, et où l'équation (7.6) est remplacée par un développement cubique autour du point de fonctionnement (ce qui exclut la prise en compte des régimes d'anche battante).

Les résultats obtenus sont intéressants [49], en particulier loin du seuil d'oscillation, où comme attendu, il suffit de peu de termes pour représenter la solution (cf. figure 4.7, à gauche, pour les γ élevés). Mais pour un couple quelconque (γ, η) , la convergence quand le nombre de termes p_i augmente n'est pas toujours garantie (cf. figure 4.7, à gauche, pour η faible, ou à droite pour η élevé). L'analyse de ce problème nous a amené à estimer un domaine de validité de chaque développement donné par l'équation (4.3). Chaque terme p_n étant d'ordre n en η , on ré-écrit $p_n \equiv \eta^n q_n$ et on estime le rayon de convergence de la série entière obtenue par deux moyens différents, à la manière de ce qui est fait dans [BC03] : soit en utilisant des tracés de Domb-sykes (q_n/q_{n+1} en fonction de $1/n$, cf. figure 4.8 à droite), soit en traçant l'évolution du résidu de la série en fonction η pour différents ordres de troncature des séries (cf. figure 4.8 à gauche). Pour le cas présenté en figure 4.8, qui correspond à $\gamma = 0.345$ on estime $\eta_{max} \simeq 1.7e-3$. L'estimation de η_{max} permet de borner le domaine de validité de l'approche par perturbation : en pratique pour $\eta > \eta_{max}$, il n'y a plus convergence. On en conclut qu'en figure 4.7, à gauche, on vient de dépasser le domaine de validité pour $\gamma = 0.345$, alors qu'à droite, le domaine de validité est largement dépassé (ce que confirme l'examen des figures). Il apparaît que η_{max} est une fonction croissante de γ , ce qui n'est pas surprenant puisque plus on s'éloigne du seuil d'oscillation, moins les effets des pertes sont sensibles, et plus on se rapproche du signal carré p_0 .

La valeur de η est donnée par la physique : pour un cylindre de longueur l et de rayon r , $\eta \simeq \frac{\sqrt{\pi} l_v}{r}$ où l_v est la longueur caractéristique des effets visqueux ($\eta \simeq 2.10^{-2}$ pour une clarinette).

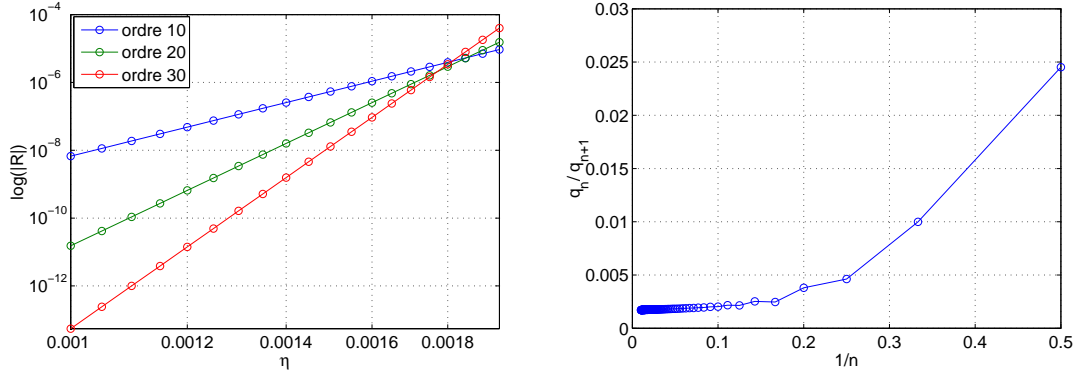


FIGURE 4.8 – **A gauche** : évolution du résidu de la série (4.3) en fonction de η pour 3 ordres de troncature différents : le point d'intersection est une estimation de $\eta_{max} \simeq 0.0018$. **A droite** : tracé de Domb-Sykes (rapport de deux termes consécutifs de la série q_n/q_{n+1} en fonction de $1/n$). L'extrapolation de la courbe sur l'axe des ordonnées ($1/n \rightarrow 0$) donne une seconde estimation de $\eta_{max} \simeq 0.0016$. Les deux courbes présentent les données relatives au premier harmonique, lorsque $\gamma = 0.345$. Figures extraites de la soutenance de stage de S. Divoir.

Pour avoir accès à la solution pour une valeur de η quelconque, il faut procéder itérativement : la solution est calculée pour une valeur $\eta < \eta_{max}$, puis on recalcule un nouveau développement de type (4.3) à partir de la solution trouvée. On procède ainsi jusqu'à ce que la valeur des pertes souhaitée rentre dans le disque de convergence du développement en série en cours. Mais l'approche peut alors devenir coûteuse en temps de calcul et nous ne l'avons pas mise en pratique. En effet, la méthode asymptotique numérique a été préférée dans ce genre de situation : elle offre un cadre bien adapté pour réaliser ce type de processus itératif de manière systématique (au paragraphe 4.4).

4.3.3 Régimes non nécessairement périodiques : du silence au chaos

Les modèles d'instruments de musique, comme d'ailleurs les instruments réels, ne produisent pas que des régimes périodiques, loin de là ! Certains régimes quasi-périodiques (souvent appelés "multiphoniques" en langage musical) sont parfois utilisés en musique contemporaine ou en jazz. Mais la diversité des possibilités offertes par un instrument est bien plus importante que les possibilités effectivement maîtrisées et utilisées couramment : au cours de son apprentissage, le musicien apprend à sélectionner certains régimes (souvent périodiques) et à éviter le chaos (pour paraphraser le titre de [Ker97]).

Mais il est très intéressant pour le physicien de caractériser cette diversité de régimes. Nous l'avons fait sur des résultats de simulations numériques, mais avec le développement récent de la bouche artificielle asservie (paragraphe 2.4) nous pourrions envisager de conduire des études similaires sur des instruments réels. En particulier dans [5], nous avons montré comment par simple augmentation de la pression dans la bouche, un modèle de cuivre passait du silence au chaos (modèle en annexe 7.2). Plus précisément, grâce à l'analyse des séries chronologiques produites par le modèle il a été établi que la route vers le chaos observée correspondait à un scénario de bifurcations de type Curry et Yorke [BPV88]. Ce scénario correspond à l'enchaînement des différentes étapes suivantes :

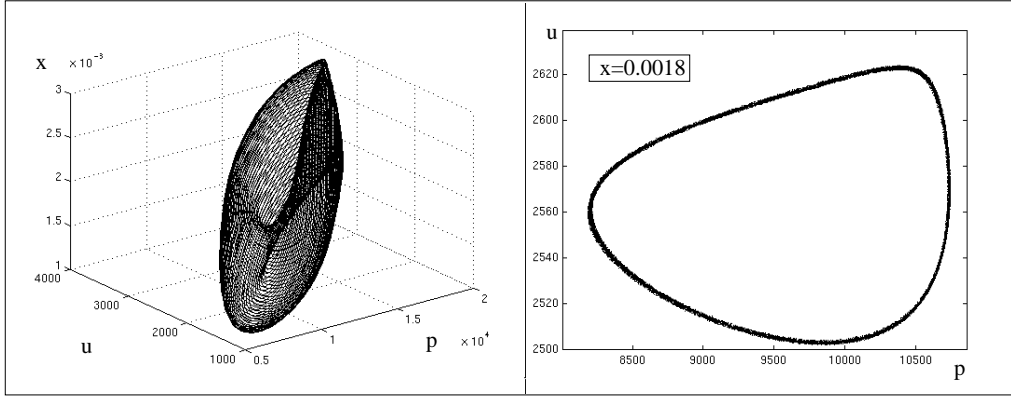


FIGURE 4.9 – Bifurcation de Hopf secondaire directe (du cycle limite) : l'attracteur du modèle devient un 2-tore T^2 (à gauche) et sa section de Poincaré dans le plan $x = 0.0018$ (à droite). Ce résultat est obtenu pour $p_{bouche} = 23316$ (x est l'ouverture des lèvres, u le débit entrant dans l'embouchure, p la pression dans l'embouchure). Figure extraite de [5].

1. Bifurcation de Hopf du point fixe : apparition d'un régime périodique par déstabilisation de la solution statique, ici par une bifurcation directe.
2. Bifurcation de Hopf de la solution périodique : apparition d'un tore à deux fréquences par déstabilisation de la solution périodique (cf. figure 4.9)
3. Destruction progressive du 2-tore qui donne naissance à un régime chaotique (cf. figure 4.10). Le caractère chaotique de la solution a été établi par des arguments temporels (plus grand exposant de Lyapunov supérieur à 0, [Aba95], [Van97]) et géométriques (dimension fractale non entière, selon Grassberger et Proccacia [GP83], algorithme de [Van97]).

Il ne s'agit donc pas d'un scénario de Ruelle et Takens, plus connu, où l'apparition du régime chaotique se fait via la déstabilisation du 2-tore et l'apparition d'un tore à trois fréquences de base. C'est d'ailleurs le scénario observé par [PCG91] lors de leur étude sur la *note du loup* sur les instruments à cordes frottées. Des régimes d'intermittence ont également été mis en évidence, constitués de phases où le régime est dit laminaire et de phases chaotiques dites bouffées turbulentes (plus la pression dans la bouche augmente et plus la longueur des bouffées turbulentes dans le signal est importante).

Au-delà de l'intérêt académique du physicien pour ce genre d'étude sur les modèles, il est intéressant de noter que plusieurs musiciens ont trouvé les sons correspondants intéressants (dans le contexte il est vrai un peu particulier de l'Ircam). Dans le cas des régimes d'intermittence par exemple, le résultat sonore est une succession de sons perçus comme périodiques en alternance avec des sons beaucoup plus bruités. Le passage d'un régime à l'autre semble "imprévisible" et introduit des structures rythmiques surprenantes.

4.4 Diagrammes de bifurcations

Collaborateurs : R. Arquier (thésard), B. Cochelin, S. Karkar (thésard)

Les approches décrites au paragraphe précédent deviennent difficiles à utiliser au-delà du calcul de la solution pour quelques valeurs du paramètre d'intérêt. Une exploration plus systématique

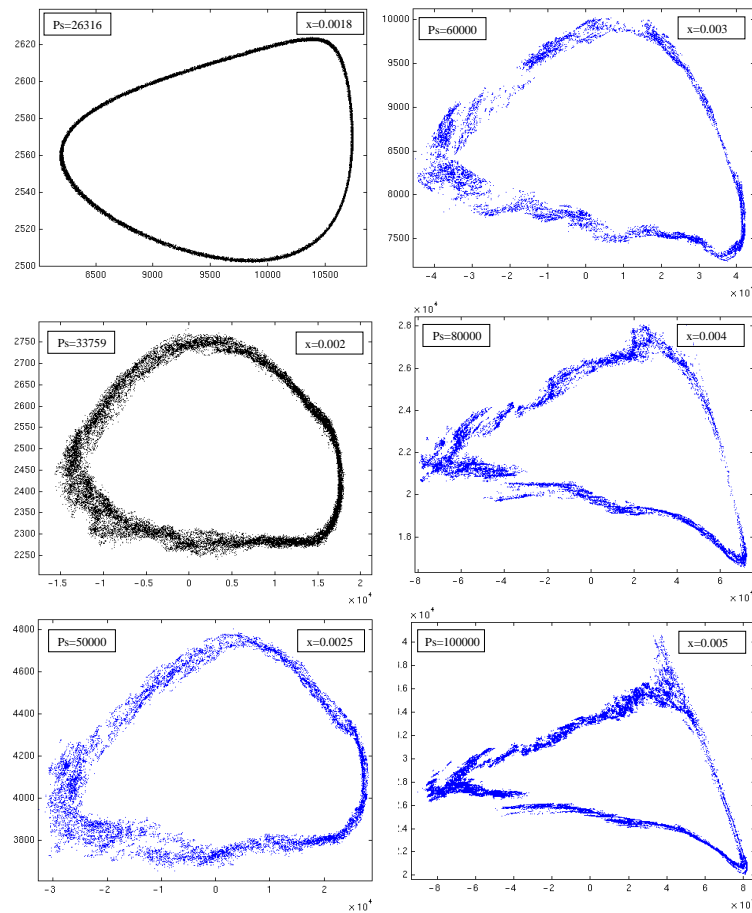


FIGURE 4.10 – Sections de Poincaré (à x constante) de l'attracteur du modèle pour plusieurs valeurs du paramètre de bifurcation p_s ($\equiv p_{bouche}$). La dispersion progressive autour de la courbe fermée quand p_s augmente révèle que les trajectoires s'échappent progressivement du 2-tore. Figure extraite de [5].

des comportements lorsque ce paramètre varie continûment nécessite l'apport d'outils numériques spécifiques. En d'autres termes, accéder à de véritables diagrammes de bifurcations requiert l'utilisation d'outils de continuation [AG03].

4.4.1 Introduction : notion de branche solution et de continuation

Plutôt que de rechercher des solutions du modèle pour des valeurs fixes des paramètres, la continuation permet de suivre l'évolution d'une solution donnée en fonction de la variation d'un paramètre. On a ainsi accès à une branche de solutions plutôt qu'à un seul point de cette branche. Soit un système dynamique non linéaire

$$\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}, \lambda), \quad \mathbf{u} \in \mathbb{R}^n, \lambda \in \mathbb{R}, \quad (4.4)$$

dont on connaît une solution \mathbf{X}_0 lorsque $\lambda = \lambda_0$. A moins de se trouver exactement sur une singularité, on déduit du théorème de la fonction implicite [KOGV07] qu'il existe un continuum (une branche) de solutions dans un voisinage de $(\mathbf{X}_0, \lambda_0)$, pour différentes valeurs de λ .

Continuation de solution : les approches de type prédicteur/correcteur sont les plus connues [AG03]. En particulier, elles servent de base au logiciel AUTO, développé par E. Doedel depuis plus 30 ans [Doe81], et aujourd'hui outil standard dans l'étude numérique des bifurcations [DO09]. Nos efforts portent plutôt sur le développement d'une autre approche : la Méthode Asymptotique Numérique (ou MAN, [CDPF07]), même si nous utilisons AUTO également.

La MAN : La méthode de continuation MAN que nous utilisons repose sur la recherche des branches de solutions sous la forme de séries entières en fonction d'un paramètre de chemin a :

$$\mathbf{U} = \sum_{i=0}^{\text{ordre}} a^i \mathbf{U}^i \quad (4.5)$$

Le vecteur d'inconnues \mathbf{U} inclut le paramètre λ (comme c'est souvent le cas dans les techniques de continuation) et le système à résoudre doit être mis sous forme algébrique :

$$\mathbf{R}(\mathbf{U}) = 0, \quad (4.6)$$

où \mathbf{U} a donc une composante de plus que le nombre d'équations de \mathbf{R} . Tout l'intérêt est de pousser le calcul des séries à des ordres élevés, ce qui fournit des représentations riches en information sur la branche. Ceci n'est possible que si le vecteur d'équation \mathbf{R} est écrit dans un formalisme simple et adapté. En particulier, lorsque \mathbf{R} est quadratique par rapport à \mathbf{U} , le calcul des séries est simple et efficace. C'est ce formalisme quadratique que nous adaptons ici :

$$\mathbf{R}(\mathbf{U}) = \mathbf{L}_0 + \mathbf{L}(\mathbf{U}) + \mathbf{Q}(\mathbf{U}, \mathbf{U}) = 0 \quad (4.7)$$

avec \mathbf{R} le vecteur résidu du système d'équation, $\dim(\mathbf{R}) = n$, \mathbf{U} le vecteur inconnu $\dim(\mathbf{U}) = n + 1$, \mathbf{L}_0 un vecteur constant, \mathbf{L} un opérateur linéaire en \mathbf{U} , et \mathbf{Q} un opérateur bilinéaire en \mathbf{U} . Le formalisme de (4.7) n'est pas aussi restrictif qu'il semblerait au premier abord : grâce à des

changements de variables astucieux ou à quelques aménagements supplémentaires [CDPF07] de nombreux problèmes de mécanique et de physique s'écrivent dans ce formalisme.

L'intérêt d'utiliser la MAN, par rapport à d'autres méthodes de continuation [KOGV07] est d'abord de profiter de sa grande robustesse [CDPF07]. De plus, la MAN apporte l'avantage par rapport aux méthodes plus classiques de type prédicteur-correcteur, de donner les solutions sous formes de développement en série et d'avoir une sélection de longueur de pas automatique. En effet à chaque développement en série est associé un domaine de validité (délimité par un a_{max}), et la continuation se fait de proche en proche, comme représenté sur la figure 4.11. Cette particularité

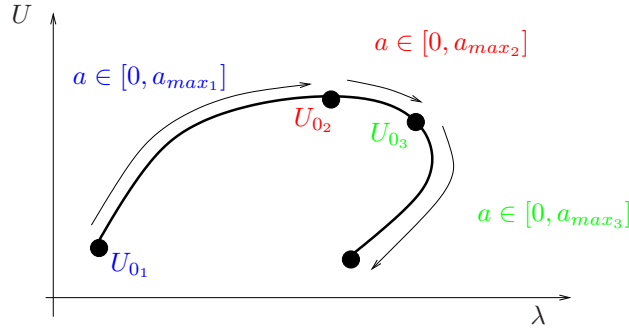


FIGURE 4.11 – Une branche est constituée de plusieurs tronçons qui correspondent chacun à un développement en série entière.

facilite grandement le passage des lieux à très forte courbure et permet donc de mettre en pratique la méthode de perturbation [AG03], comme moyen de branchements aux points de bifurcations [BC03, Coc05].

Manlab : MANLAB est un logiciel de continuation interactif écrit par R. Arquier [53, 82], basé sur la méthode de continuation MAN décrite ci-dessus. Écrit en Matlab, MANLAB est doté d'une interface graphique permettant de construire de manière interactive le diagramme de bifurcation : calcul d'une ou plusieurs nouvelles branches, effacement, sauvegarde, visualisation de portions de branches, fonction de saut et méthode de branchement par perturbation. C'est cet outil que nous utilisons pour réaliser des continuations et que nous contribuons à développer (cf. paragraphes suivants).

4.4.2 MAN et équilibrage harmonique purement fréquentiel

La combinaison de la méthode d'équilibrage harmonique avec une technique de continuation est une approche largement utilisée pour suivre les solutions périodiques d'un système dynamique en fonction d'un paramètre de bifurcation. Cependant, comme l'écriture du système algébrique liant les coefficients de Fourier peut vite devenir compliquée, l'approche classique se limite souvent à des non-linéarités simples (quadratiques, cubiques) et/ou à un nombre d'harmoniques faible. Des variantes de l'équilibrage harmonique ont certes été introduites dans la littérature pour pallier cet inconvénient de l'approche classique, par exemple l'équilibrage harmonique incrémental ou l'équilibrage harmonique reposant sur des aller-retour dans les domaines fréquentiels et temporels (c'est l'approche suivie en 4.3.1 avec HARMBAL).

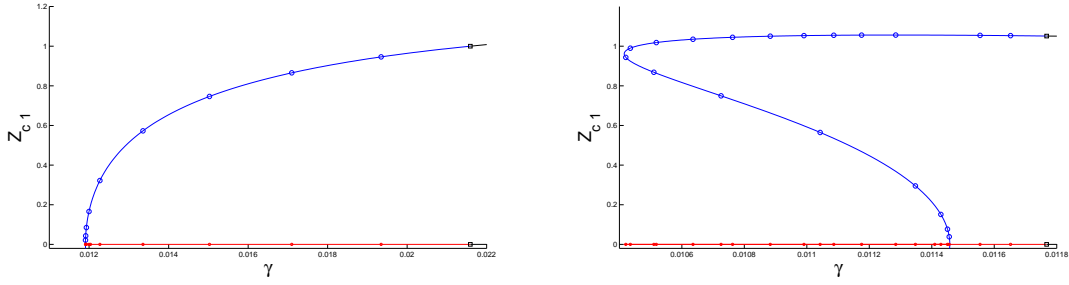


FIGURE 4.12 – Diagramme de bifurcation (partiel) d'un modèle de clarinette (amplitude du 1^{er} harmonique en fonction de la pression dans la bouche adimensionnée), faisant apparaître à l'émission du son une bifurcation de Hopf directe (à gauche) et inverse (à droite). Entre les deux figures, seul le rapport entre la fréquence de résonance du mode acoustique du résonateur et la fréquence de résonance mécanique de l'anche est modifié. Extrait de [13].

Dans le travail que nous avons réalisé [13], nous proposons une alternative qui peut être appliquée à une large classe de systèmes dynamiques (autonomes ou pas, conservatifs ou dissipatifs). L'idée centrale est de reformuler de manière quadratique le système de départ avant d'appliquer l'équilibrage harmonique. Ainsi l'écriture du système algébrique reliant les coefficients de Fourier et sa résolution par une méthode asymptotique numérique peut s'automatiser.

Nous présentons en figure 4.12 la continuation d'une bifurcation directe et inverse d'un modèle de clarinette (annexe 7.1, modèle à trois équations avec résonateur cylindrique), exercice qui nous avait demandé un énorme travail avec HARMBAL alors qu'il ne prend que quelques secondes ici. Au passage nous répondons aux questions laissées en suspens dans [11] sur la nature de la bifurcation : un modèle de clarinette peut présenter des bifurcations de Hopf directes et inverses. Ici c'est la valeur du rapport entre fréquences de résonance mécanique et acoustique qui change entre les deux figures et conditionne le type de bifurcation. Des diagrammes plus complets, de l'émergence de l'oscillation à l'extinction, ont récemment été obtenus [63]. En figure 4.13, on présente, à gauche la branche statique et les départs des branches périodiques correspondant aux différents registres (ici, plus la fréquence du registre est basse, plus le seuil en p_{bouche} aussi). A droite, une vue plus large révèle l'ensemble des cinq branches. L'étude de stabilité montre que seule la branche correspondant au premier registre est stable. Cet outil semble très prometteur comme moyen d'investigation des comportements d'un modèle. On reconnaît facilement les différents éléments mis en évidence analytiquement pour le premier registre sur un modèle beaucoup plus simple (dit de Raman, annexe 7.1.4) par Dalmont et al. [DGK05] : seuil d'oscillation ($P_{bouche} \simeq 900\text{Pa}$), seuil d'anche battante ($P_{bouche} \simeq 1100\text{Pa}$), seuil de saturation ($P_{bouche} \simeq 4000\text{Pa}$) et seuil d'extinction ($P_{bouche} \simeq 4300\text{Pa}$). Si on se concentre sur la première branche (l'unique stable) il est possible d'accéder sans calcul supplémentaire à l'évolution de la fréquence de jeu le long de la branche (figure 4.14 à gauche) ainsi qu'à l'évolution du contenu spectral (amplitude de chaque harmonique, figure 4.14 à droite). La fréquence évolue dans un intervalle faible mais significatif pour la perception (18 cents environ) et l'analyse de la répartition de l'énergie entre les différents harmoniques permet de préciser le domaine de validité de certaines hypothèses de la littérature. Par exemple, la loi de Worman stipule que dans un voisinage du seuil d'oscillation, l'amplitude de l'harmonique de rang n varie comme la puissance n de l'amplitude du premier harmonique. Nous avons pu vérifier

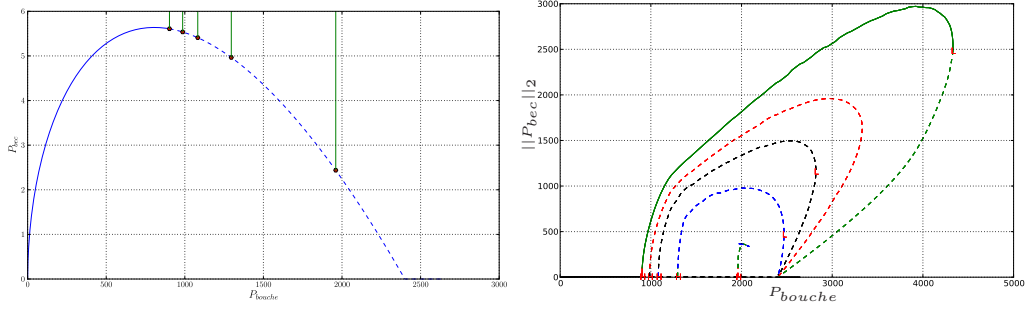


FIGURE 4.13 – Amplitude de la pression dans le bec de la clarinette en fonction de la pression dans la bouche (AUTO). **A gauche** : branche statique et départ des branches de solutions périodiques du modèle. **A droite** : diagramme de bifurcation du modèle (pressions en Pascal). Les branches en pointillés sont instables. Figures extraites de [63].

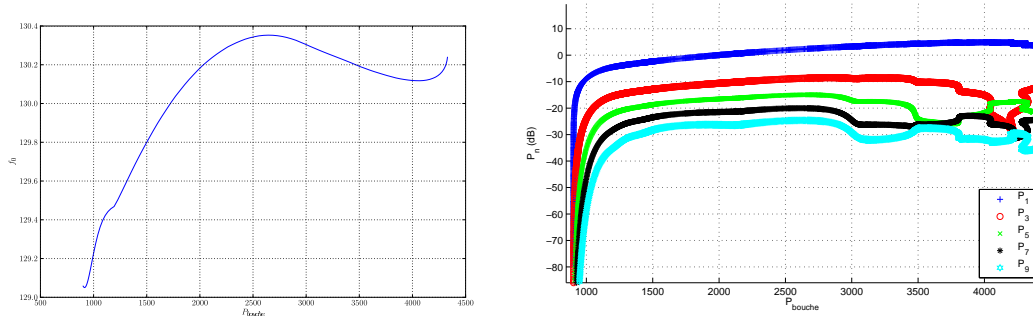


FIGURE 4.14 – **A gauche** : fréquence de jeu f_0 en fonction de P_{bouche} (en Pa). Partie stable uniquement. **A droite** : variation de l'amplitude des harmoniques impairs (en dB) en fonction de la pression dans la bouche (en Pa) le long du premier régime périodique jusqu'à extinction. A partir des résultats obtenus dans [67].

que le domaine de validité de cette approximation est très réduit, dans la configuration étudiée à peine 30 Pa (soit 0.8% de la plage de jouabilité du modèle), un domaine à peine discernable sur la figure 4.14 droite. Au delà, notre approche fournit une référence intéressante à confronter à des méthodes approchées, comme par exemple l'équilibrage harmonique à troncature variable [KOG00]. On sent aussi l'intérêt qu'il peut y avoir à confronter dans l'avenir ces résultats à ceux obtenus par la bouche artificielle asservie (outil expérimental décrit au paragraphe 2.4). Une illustration est d'ailleurs présentée dans la conclusion.

On ne le détaille pas ici mais il faut un travail réel pour transformer le modèle de clarinette non régulier (en particulier à cause des épisodes où l'anche bat) en un système quadratique. Cela se fait au prix de régularisations, ce qui augmente la taille du système à résoudre (voire introduit des solutions non physiques, qu'il est assez facile d'identifier et de disqualifier grâce à l'interactivité offerte par MANLAB). De même dans le cas de régimes d'anche battante, un nombre élevé d'harmoniques peut être nécessaire. A titre d'illustration les figures présentées sont les résultats de calculs à 15 harmoniques, pour une approximation du résonateur à 12 modes, ce qui conduit à des systèmes d'environ 1000 équations et 1001 inconnues. Conserver dans ces conditions un outil interactif a nécessité d'importantes optimisations du code, effectuées par S. Karkar.

Dans [13] on montre aussi la possibilité de suivre des doublements de période, de traiter des problèmes divers, autonomes ou forcés. La portée de la méthode dépasse le cadre de l'acoustique musicale et on trouve beaucoup d'applications potentielles dans le milieu des vibrations non linéaires. Le logiciel est mis à disposition [82] avec une série d'exemples, et une documentation. On compte à ce jour 320 téléchargements.

4.4.3 Alternative à l'équilibrage harmonique : MAN et continuation d'orbites temporelles

Principe : dans le paragraphe précédent, on passe du système à temps continu au système algébrique résolu par la MAN en utilisant la décomposition des inconnues en séries de Fourier tronquées. Une alternative est de discrétiser les solutions périodiques recherchées dans le domaine temporel. Partant de l'équation (4.4), on spécifie le nombre de points d'échantillonnage par période : les inconnues sont alors les échantillons de la variable \mathbf{X} aux instants de discrétisation t_1, \dots, t_{N_p} , ainsi que la période. Les équations du système devant être vérifiées pour chaque échantillon de la solution, on peut les écrire en chacun de ces instants t_i , en utilisant le schéma de dérivation numérique que l'on souhaite. On ferme alors le nouveau système d'équations par la condition de périodicité $\mathbf{X}(t_{N_p+1}) = \mathbf{X}(t_1)$ et par une équation de phase ([AC05, MAFG⁺03] pour les systèmes conservatifs).

Nous avons exploré un cas particulier de cette approche : celui où le modèle est donné sous la forme d'une carte itérée. Dans ce cas il n'est même pas nécessaire d'utiliser un schéma de discrétisation pour disposer du système algébrique.

Mise en oeuvre sur le modèle de clarinette de Raman : lors d'un travail non encore publié, nous avons validé l'approche sur les cartes itérées en revisitant une étude analytique [DGKO05] du modèle de clarinette dit "de Raman". Sans rentrer dans les détails qui sont consultables en annexe 7.1.4, on part d'un modèle qui s'écrit :

$$p_n = \zeta(1 - \gamma + p_n)H(1 - \gamma + p_n)\sqrt{\gamma - p_n} + \lambda [p_{n-1} + \zeta(1 - \gamma + p_{n-1})H(1 - \gamma + p_{n-1})\sqrt{\gamma - p_{n-1}}] \quad (4.8)$$

où H est la fonction de Heaviside et λ, ζ, γ les paramètres du modèle. Les inconnues sont p_n et p_{n-1} , la pression acoustique dans le bec (aux instants t_n, t_{n-1}). L'équation (4.8) est déjà algébrique, mais pas quadratique. Quelques détails sur la transformation de (4.8) en système quadratique sont données en annexe 7.1.4.

La figure 4.15, obtenue avec MANLAB, présente par exemple le diagramme de bifurcation pour trois variables du modèle : de haut en bas l'ouverture de l'anche, le débit, et la pression acoustique en fonction de la différence de pression statique entre la bouche et l'embouchure. Les calculs sont effectués pour différentes valeurs du paramètre adimensionné de pertes β_1 . Ce paramètre est défini dans [DGKO05, eq. (17) page 3297] comme "l'admittance adimensionnée à la fréquence de jeu" :

$$\beta_1 = \frac{p_M}{Z_c u_A} \tanh \alpha L \quad (4.9)$$

$$i.e. \beta_1 = \frac{1}{\zeta} \tanh \alpha L \quad (4.10)$$

Les deux figures du haut permettent de contrôler a posteriori la qualité de la solution, en particulier au niveau du changement de comportement quand $\Delta p > 1$ (régime d'anche battante, $x = 0, u = 0$ imposés par les fonctions de Heaviside). Dans la figure du bas, les seuils analytiques trouvés dans [DGKO05] sont tracés comme des lignes verticales, ce qui permet de valider notre approche.

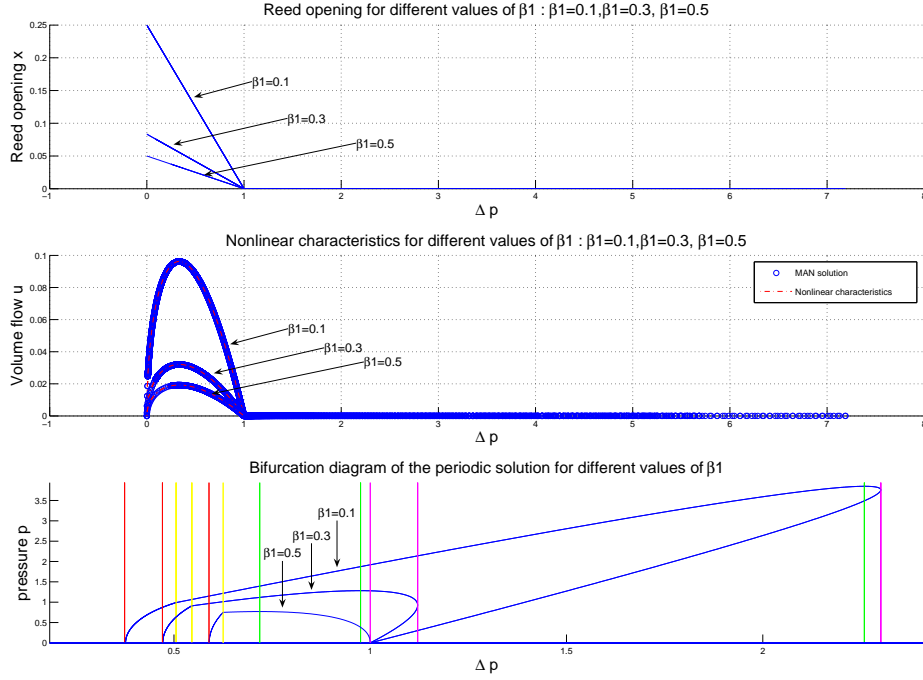


FIGURE 4.15 – Influence d'un paramètre adimensionné de pertes β_1 (défini dans [DGKO05]) sur le diagramme de bifurcation du modèle de Raman. Sur la figure du bas les lignes verticales correspondent à des solutions analytiques données dans [DGKO05]. Sur les deux figures du haut, on peut vérifier qu'on restitue bien le placage de l'anche. Extrait d'un article en préparation.

Avantages : le premier avantage est sans doute la rapidité avec laquelle on accède à ces données : un diagramme pour une valeur de β_1 donnée s'obtient en quelques secondes. Le second avantage qui en découle est la possibilité d'explorer les comportements du modèle en faisant varier les paramètres de manière importante : nous avons ainsi mis en évidence une bifurcation de Hopf inverse au seuil. Le troisième avantage est qu'il est possible d'apprécier l'influence de certaines approximations introduites dans [DGKO05] pour accéder aux expressions analytiques des seuils. Le quatrième avantage est qu'il est possible d'accéder aux cycles limites stables et instables (mais une limitation est qu'actuellement la méthode ne permet pas de les distinguer). Le cinquième avantage est que l'approche n'est pas limitée aux diagrammes de bifurcation relativement simples comme ceux de la figure 4.15. Par exemple, pour $\beta_1 = 0.01$, la figure 4.16 met en évidence un mécanisme de cascade sous-harmonique (c.-à-d. une succession de doublements de périodes).

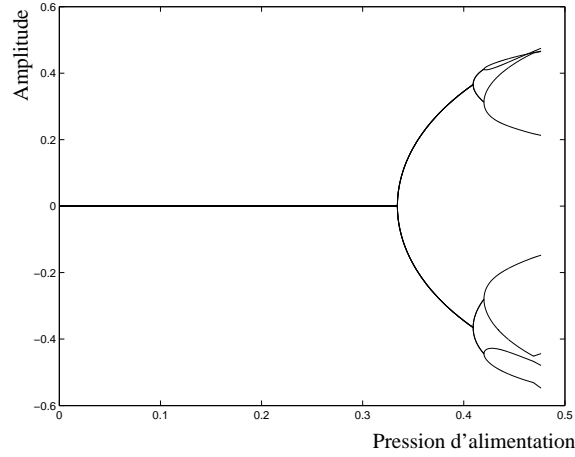


FIGURE 4.16 – Succession de doublements de périodes pour le modèle de clarinette de Raman ($\beta_1 = 0.01$), obtenue par continuation d'orbite périodique avec le logiciel MANLAB. Extrait d'un article en préparation.

4.4.4 Cas particulier de continuation : la continuation de bifurcations

Plutôt que d'examiner l'évolution d'un modèle lorsqu'un paramètre varie, comme on l'a vu jusqu'à présent, il peut être également très instructif de suivre l'évolution d'un point particulier en fonction de deux paramètres. Ce point particulier peut être une bifurcation de Hopf, comme en figure 4.17 où les bifurcations relatives aux différents registres sont représentées en fonction p_m et q_r (à gauche) et de p_m et h_0 (à droite). Ces calculs sont faits dans le logiciel AUTO où cette fonctionnalité est directement implantée. On peut trouver plusieurs intérêts à ces courbes, nous en développons deux :

Accès plus sélectif à l'information : on peut connaître l'évolution de points particuliers du diagramme de bifurcation en fonction des paramètres principaux du modèle, sans avoir à refaire des diagrammes complets. Sur la figure 4.17, nous avons choisi de suivre l'évolution des points de Hopf mais pour un modèle d'instrument à anche (et en se référant à la figure 4.13) on pourrait choisir de suivre l'évolution des seuils d'anche battante, de saturation, d'extinction ... pour accéder à l'évolution de quantités directement interprétables dans un contexte musical : conditions pour obtenir une note, plage de p_{bouche} utilisable, dynamique de jeu du modèle (i.e. différence entre volume sonore maximal et minimal) ... On réalise ainsi une économie très significative par rapport au cas où on devrait faire autant de diagrammes de bifurcations à un paramètre que l'imposerait le maillage de l'espace des paramètres !

Sensibilité du modèle au seuil d'oscillation pour toute combinaison de paramètres : suite à la thèse de F. Silva [Sil09], nous sommes engagés dans la confrontation des résultats obtenus par le modèle de l'état de l'art (annexe 7.1) et ceux auxquels on peut accéder en utilisant la bouche artificielle asservie : actuellement, pour les seuils d'oscillation ([64] ou paragraphe 2.2.3), mais plus généralement pour l'ensemble des comportements périodiques. Pour ce genre d'exercice, les résultats doivent idéalement être donnés avec des barres d'erreur, afin de pouvoir décider si l'accord ou le désaccord entre modèle et expérience est significatif ou pas. Ces barres d'erreur s'estiment

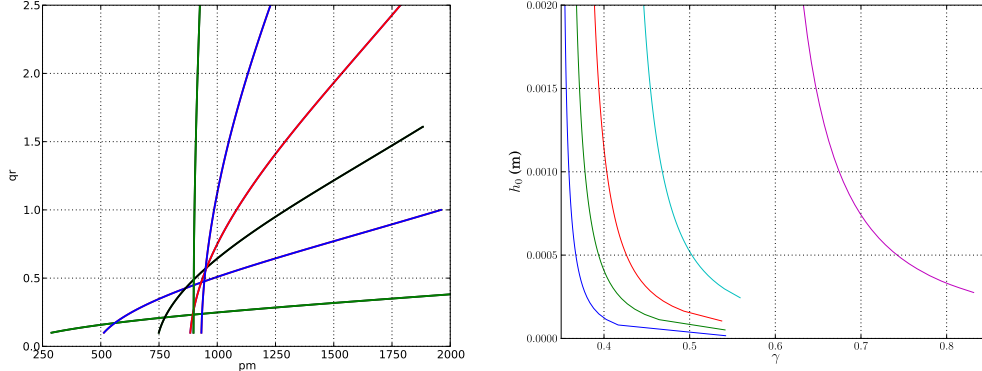


FIGURE 4.17 – Evolution des bifurcations de Hopf associées aux différents registres lorsque deux paramètres varient : **à gauche**, l’amortissement de l’anche q_r et la pression dans la bouche p_m , **à droite** la position de l’anche au repos h_0 et la pression dans la bouche adimensionnée p_m/P_M . Figures extraites de la thèse de S. Karkar (réalisées avec AUTO).

en sommant les produits ”incertitude de mesure” fois ”sensibilité du modèle” pour chacun des paramètres. Or le système étant non linéaire, la sensibilité en chacun de ses paramètres est une grandeur locale à évaluer autour de chaque point de fonctionnement. Les courbes présentées en figure 4.17 donnent directement accès aux sensibilités locales puisqu’il s’agit de la pente des courbes par rapport à l’évolution de chaque paramètre. Par exemple, en figure 4.17 à gauche, il apparaît que la sensibilité du seuil d’oscillation en p_m lorsque q_r varie est quasiment nulle lorsque $q_r > 0.5$ (branche presque verticale), mais que la situation est radicalement différente pour les faibles valeurs de q_r . De même sur la figure de droite on peut vérifier un comportement auquel l’expérience nous a habitué : le seuil d’oscillation en p_m est peu sensible à la variation de h_0 lorsque h_0 est grand, mais sa sensibilité augmente continûment pour devenir ”infinie” aux petites ouvertures.

4.5 Perspectives

Application des travaux actuels de la thèse de S. Karkar (coll B. Cochelin)

Le hautbois est-il un saxophone comme les autres ? En utilisant les résultats expérimentaux obtenus par A. Almeida présentés au paragraphe 2.2.1, et en utilisant les outils d’analyses présentés dans ce chapitre, on doit pouvoir apporter des éléments de réponse à cette question intrigante : le saxophone est-il un hautbois à anche simple ? Autrement dit qu’est-ce qui caractérise l’instrument : l’anche double (via sa caractéristique débit/pression particulière) ou l’angle du cône (via ses modes acoustiques) ? En termes de ”perception” la synthèse sonore donne déjà des éléments de réponse, mais l’établissement de diagrammes de bifurcations apportera un éclairage original en terme de comportement de l’instrument : sélection de registres, timbre du son ...

Guider la réduction de modèle : les termes non linéaires, qui couplent les différents degrés de liberté, masquent souvent l’importance de certains termes dans un modèle. Pour des applications en simulation numérique, le temps de calcul devient un élément important et on est alors confronté

à la difficile question de l'estimation du prix à payer pour une simplification du modèle. En synthèse sonore, où le calcul se fait en temps réel, cette problématique est omni-présente. Les outils présentés dans ce chapitre peuvent révéler les différences qualitatives et quantitatives entre deux modèles, pour des simplifications de natures différentes souvent mises en oeuvre dans les modèles de synthèse : réduction du nombre de degrés de liberté (par troncature modale par exemple, [GS10]), simplification du modèle d'impact de l'anche sur le bec [GKV05], ou même choix du schéma numérique et de la fréquence d'échantillonnage temporel (dont on peut évaluer l'impact en faisant de la continuation en temporel sur le système algébrique discrétisé par le schéma à étudier).

Recherches à venir dans la thèse de S. Karkar (coll B. Cochelin)

Continuation d'orbites périodiques en temporel, sur des modèles peu réguliers : au delà du travail déjà engagé sur la clarinette de Raman (paragraphe 4.4.3), il s'agira de montrer qu'une large classe de modèles d'instruments à vent peut être traitée par la méthode, en particulier des modèles plus complexes où la fréquence de jeu est inconnue, où la dynamique du résonateur inclut des convolutions (résonateurs non cylindriques), où le résonateur a un comportement lui-même non linéaire (pertes non linéaires à fort niveau en bout d'instrument, ou aux trous latéraux). Pour cela, la transformation du système différentiel constituant le modèle en système algébrique à résoudre par continuation peut se faire en utilisant soit l'approche par collocation orthogonale (utilisé dans AUTO), soit des schémas d'intégration plus classiques pour justement les évaluer et les comparer (cf. perspective précédente).

Des extensions aux instruments à cordes frottées seraient fort intéressantes, car le modèle comporte une non régularité importante (alternance de phases d'accrochage/glisement entre la corde et l'archet) .

Bifurcations des régimes périodiques, et régimes périodiques non standards : nous nous concentrons actuellement sur les régimes périodiques, issus de bifurcations de Hopf de la solution statique, ce qui est logique : ces régimes sont les plus fréquents. Pour autant, nous souhaitons investiguer les régimes quasi-périodiques, qui peuvent être souhaités par le musicien (régimes multiphoniques en musique contemporaine) ou pas (phénomènes de roulements de note, tels que la note du loup sur les violoncelles, ou plus fréquemment sur les notes graves des flûtes à bec) ou les régimes périodiques issus de bifurcations d'autres régimes périodiques (cas des doublements de période).

A plus long terme ...

Bifurcations dynamiques : un diagramme de bifurcation donne des informations sur le comportement d'un modèle en supposant que les variations des paramètres sont quasi-statiques. Dans une situation de jeu (instrumental ou en synthèse sonore), ces conditions peuvent ne pas être respectées. En effet, même si les paramètres de contrôle (les gestes du musicien) évoluent lentement en comparaison des variables du système, l'influence de la dynamique de variation des paramètres peut être sensible, près des bifurcations en particulier où on ne peut échapper au ralentissement critique des systèmes [TLM⁺04]. Ces effets se manifestent lorsqu'on confronte diagramme de bi-

furcation et simulation temporelle [14] et compliquent la localisation des bifurcations lors d'une expérience [64].

Dans le projet ANR SDNS-AIMV déjà évoqué, nous nous intéresserons à cette question pour des modèles très simples, de type oscillateur de Van der Pol : peut-on intégrer à l'analyse des régimes, la dynamique, même simplifiée, des paramètres de contrôle ?

Calcul des variétés invariantes de systèmes dissipatifs : application aux modes non linéaires (coll. S. Bellizzi et B. Cochelin) : nous avons vu au paragraphe 3.2.3 qu'il était difficile de calculer numériquement le mode non linéaire à des amplitudes arbitraires, ce qui est très frustrant : d'une part parce qu'on ne comprend pas pourquoi, d'autre part parce que l'utilisation des modes non linéaires est justement motivée par la volonté d'explorer le comportement du modèle pour des dynamiques importantes.

Une approche alternative pourrait être de calculer le mode non linéaire avec la MAN par continuation de la variété (en s'inspirant de ce qui est fait par Arquier et al. dans [ABBC06] pour les systèmes conservatifs). Une différence importante est que dans le cas de systèmes dissipatifs (comme les instruments de musique), on ne dispose pas d'un continuum de solutions périodiques pour explorer la variété.

Chapitre 5

Conclusion

Quel bilan peut-on tirer de ces dix années de recherche depuis la thèse, en regard des motivations énoncées dans l'introduction : l'exploration des relations entre les paramètres liés à la facture instrumentale (géométrie, matériaux), les paramètres ajustés par le musicien (doigtés, souffle, pince et autres contrôles) et les caractéristiques des sons produits ?

Mon intérêt pour les instruments à vent m'a conduit à mener des recherches selon différentes approches : l'étude de la physique proprement dite (chapitre 2), la reformulation de modèles pour essayer tour à tour de clarifier l'analyse, de calculer plus vite les solutions ou de transformer les modèles en instruments de musique numériques (chapitre 3), l'étude des bifurcations des modèles (chapitre 4).

Les travaux que j'ai menés peuvent être situés à l'interface des vibrations induites par un écoulement, de l'acoustique en guide d'onde, de l'automatique, des systèmes dynamiques non linéaires, du traitement de signal et de l'informatique temps-réel. C'est souvent le caractère non linéaire d'un problème qui suscite mon intérêt.

En essayant de dépasser les particularités des travaux effectués, voici quelques idées de synthèse que je retiens en conclusion de ce mémoire :

Relecture des recherches effectuées

En termes d'inflexion des recherches menées

Prise en compte grandissante du musicien dans mes recherches J'envisage de moins en moins l'instrument comme un système autonome (au sens premier du terme), mais comme une partie du couple instrument/instrumentiste. Progressivement j'essaie d'intégrer le musicien à l'objet de recherches. Comment ?

- En développant une instrumentation adaptée à la mesure in vivo des gestes lors du jeu instrumental.
- En me posant de plus en plus la question de la représentativité des bouches artificielles, et en les faisant évoluer en conséquence.
- En modélisant certaines fonctions du musicien (couplage acoustique du conduit vocal avec l'instrument) pour en analyser l'influence.

- En cherchant à caractériser et comprendre l’influence de la dynamique des paramètres de contrôle, au delà de leurs valeurs proprement dites (cf. orientations futures et le projet SDNS-AIMV).

Des outils/méthodes de plus en plus généraux Une des difficultés du chercheur est de gérer son effort entre les différents aspects du métier. Le développement d’outils numériques ou expérimentaux fait partie des investissements conséquents en temps. Je fais en sorte que les développements auxquels je participe aujourd’hui aient un formalisme suffisamment ouvert pour pouvoir, avec un minimum de travail, répondre à des utilisations futures. Si je prends comme référence mon travail de thèse qui est le parfait contre-exemple, voici comment j’analyse mes travaux actuels :

- Simulation : l’outil MOREESC est développé initialement pour la clarinette. Mais le formalisme modal choisi permet de manière presque transparente de simuler n’importe quel instrument à anche. Quelques développements mineurs ont récemment permis d’évoluer vers la simulation de cuivres.
- Analyse des bifurcations : la méthode d’équilibrage harmonique que nous avons mise en oeuvre dans HARMBAL pour les instrument à anche et les cuivres a encore gagné en généralité avec les développements récents sur MANLAB. Au point que dans ce dernier cas, la motivation avec B. Cochelin était de proposer un outil compatible avec les formulations des modèles d’instruments, mais avant tout potentiellement utile à toute la communauté des vibrations non linéaires.
- Expérience : paradoxalement dans ce domaine, il me semble important de ne pas systématiquement viser le banc d’expérience le plus généraliste possible. Mes expériences en la matière ont montré qu’il peut être plus avantageux de multiplier des montages à vocation ciblée. En revanche, le pilotage des expériences est un point où la mutualisation des efforts est tangible. C’est l’approche que nous développons avec l’environnement dSpace pour les asservissements et les mesures, trait d’union entre toutes les expériences développées.

En termes de démarche scientifique

Multiplier les points de vue Ma manière de travailler se traduit par une diversification des angles d’attaque d’un même sujet. Approche irréaliste si elle ne s’appuie pas sur des collaborations : elles me permettent de mener de front plusieurs activités de natures différentes, d’élargir mes compétences et mes points de vue. Cette parallélisation des travaux est, j’en suis persuadé, féconde en idées nouvelles et sert l’objectif premier. Pour ne prendre qu’un exemple on lira dans le paragraphe ci-après sur les orientations futures comment les développements expérimentaux autour de la bouche artificielle asservie d’une part, et de continuation numérique des solutions d’un modèle d’autre part, peuvent se répondre.

Diffusion des outils développés : qu’il s’agisse de simulation numérique (logiciel MOREESC), d’expérimentation (bouche artificielle asservie) ou d’analyse des systèmes (HARMBAL, MANLAB), diffuser les outils, et donc les rendre ré-utilisables par d’autres, demande un investissement en temps conséquent, mais c’est un excellent moyen de les pérenniser, y compris pour ses propres travaux futurs. C’est sans doute aussi un bon moyen de favoriser de nouvelles collaborations.

Une place importante à la formation pour et par la recherche : comme en témoignent les rubriques correspondantes de mon CV, j'accorde une place importante à l'encadrement (p 127) et à l'enseignement (p 130).

- Enseignement : il s'agit de formation initiale la plupart du temps, mais nous avons participé récemment à un stage de formation continue pour un professionnel de la facture instrumentale. La formation est un moyen original d'amorcer des relations sur le plan scientifique avec des acteurs professionnels.
- Encadrement : la formation par la recherche de stagiaires, de doctorants ou post-doctorants m'offre aussi un cadre bien adapté pour concrétiser des collaborations avec des collègues.

Ouverture vers d'autres domaines : je ne crois pas qu'il soit exagéré de dire que des problématiques d'acoustique musicale peuvent tirer parti d'autres disciplines, mais aussi avoir en retour des répercussions vers ces disciplines, parce que les problèmes posés sont stimulants et font avancer l'état de l'art. Il me semble d'ailleurs important de garder cela à l'esprit lorsqu'on définit des sujets pour des stagiaires, doctorants ou post-doctorants : le passage par l'acoustique musicale doit être une étape valorisable dans un parcours de formation professionnelle à finalité non musicale.

Orientations futures

Qu'est-ce qui émerge aujourd'hui ? J'ai clôturé chaque chapitre par un éventail de perspectives techniques. Je précise ici les orientations plus générales qu'elles favorisent.

Vers l'étude des familles d'instruments de musique Une famille d'instruments est l'ensemble des instruments du même type, ce qui permet de couvrir une tessiture plus étendue que celle d'un unique instrument. Par exemple, la famille des saxophones compte aujourd'hui 7 membres : contrebasse, basse, baryton, ténor, alto, soprano, sopranino.

S'intéresser à toute une famille d'instruments plutôt qu'à un instrument particulier permet de poser des questions différentes :

- Quels sont les choix (et les compromis) faits par les facteurs ? En effet une simple reproduction à des échelles différentes conduirait rapidement à des instruments non compatibles avec la morphologie humaine. Quels sont les principes qui ont guidé les facteurs ?
- Du point de vue du contrôle des instruments, quels sont les points communs et les différences entre membres de la famille ? Dans quelle mesure un instrumentiste peut-il jouer plusieurs instruments de la famille ?
- Du point de vue du son produit, qu'est-ce qui signe l'identité sonore de la famille ?

B. Fabre et V. François [Bla09] montrent des résultats très originaux sur ces questions relatives aux ensembles (Consort) de flûte à bec. Nous nous intéresserons aux familles de saxophones : un sujet de thèse est déposé.

Approches croisées La recherche est souvent affaire de cycles : on peut remarquer à cet égard que plusieurs outils arrivent à maturité et que mon attention va maintenant se focaliser moins sur leurs performances intrinsèques que sur leur apport à des problématiques d'acoustique musicale.

Je pense en particulier à la bouche artificielle asservie, au code de simulation temporelle MOREESC ou à la continuation de solution périodique avec MANLAB. Ces outils seront bien sûr améliorés (dans des directions qui sont esquissées dans les chapitres correspondants) mais leur utilisation va permettre d'accéder à des informations inédites à ce niveau de détail ou de précision.

A titre illustratif, arrêtons-nous sur l'exemple de l'évolution de la fréquence de jeu et du timbre d'un instrument à vent, que l'on va pouvoir appréhender soit expérimentalement (figure 5.1 en bas) soit par l'analyse d'un modèle (figure 5.1 en haut). Il ne s'agit pas d'une confrontation (les paramètres n'ont pas été choisis pour faire correspondre modèle et expérience) mais d'une simple juxtaposition, qui laisse pourtant apparaître plusieurs éléments communs, qu'on s'intéresse à l'évolution du timbre ou de la fréquence de jeu. Ainsi, on n'a certainement pas attendu la bouche artificielle asservie et la continuation numérique pour faire des études sur le timbre de la clarinette, mais les détails et la qualité des informations auxquelles on accède laissent espérer des résultats nouveaux.

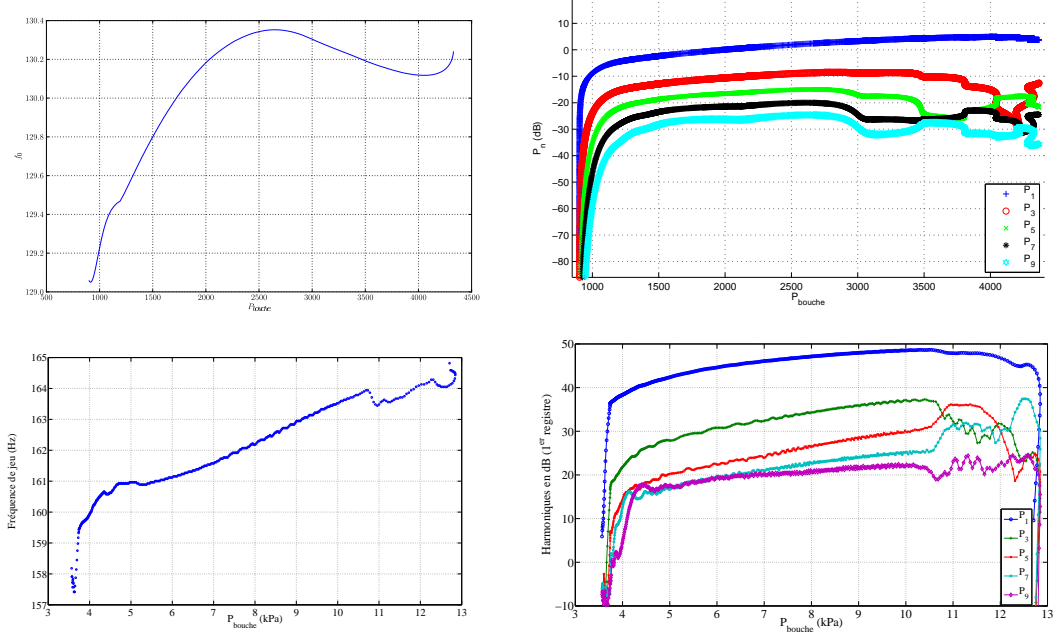


FIGURE 5.1 – **En haut** : résultats obtenus sur un modèle de clarinette par équilibrage harmonique avec MANLAB (paragraphe 4.4.2) **En bas** : mesure avec une clarinette et bouche artificielle asservie. **A gauche** : fréquence de jeu f_0 en fonction de P_{bouche} (en Pa). **A droite** : variation de l'amplitude des harmoniques impairs (en dB) en fonction de P_{bouche} (en Pa) le long du premier régime périodique jusqu'à extinction.

Régimes transitoires Une partie significative des travaux à venir s'inscrira dans le cadre du projet ANR SDNS-AIMV (Systèmes Dynamiques Non Stationnaires : Application Aux Instruments à Vent, 2010-2013). Ce projet (programme "retour post-doctorant") vise à étudier le comportement d'instruments auto-oscillants lorsque leurs paramètres de contrôle varient dans le temps. L'instrument peut présenter des transitions rapides entre régimes pour des variations infinitésimales des paramètres, ce sont des bifurcations au sens classique du terme. Mais pour une transition entre

deux valeurs de paramètres données, l'influence de la dynamique de la transition sera aussi étudiée, en faisant référence au concept de bifurcation dynamique.

Le projet, coordonné par A. Almeida (LAUM) prévoit des études expérimentales (bouche artificielle ou instrumentistes), numériques (analyse ou simulation) et analytique (modèles simplifiés). Les retombées pédagogiques auprès des musiciens seront également recherchées.

Transfert des connaissances et applications : le transfert des connaissances vers la facture ou les instrumentistes reste un objectif motivant, celui d'éclairer ou, mieux, d'enrichir leur pratique, à la lumière des résultats de recherches plus fondamentales. De même pour les applications en synthèse sonore, qui permettent souvent aux résultats de recherches de franchir les portes du laboratoire.

Ma priorité reste l'approche fondamentale du fonctionnement des instruments à vent, mais j'essaie de plus en plus de mettre en relation des résultats de recherche avec des problématiques issues d'échanges avec des instrumentistes ou des facteurs. Loin de détourner de l'objectif premier, cela nourrit ma réflexion sur le type d'information à rechercher lors de l'analyse de résultats expérimentaux, numériques ou théoriques.

Chapitre 6

Bibliographie

Bibliographie personnelle

Revues à comité de lecture

- [1] X. Rodet, C. Vergez, "Nonlinear Dynamics in Physical Models : Simple Feedback-Loop Systems and Properties", *Computer Music Journal*, 1999, Volume 23, numéro 3, pp. 18-34.
- [2] X. Rodet, C. Vergez, "Nonlinear Dynamics in Physical Models : From Basic Models to True Musical Instruments", *Computer Music Journal*, 1999, Volume 23, numéro 3, pp. 35-49.
- [3] C. Vergez, X. Rodet, "Dynamical Systems and Physical Models of Trumpet-like Instruments. Analytical Study and Asymptotical Properties", *Acta Acustica united with Acustica*, 2000, Volume 86, numéro 1, pp. 147-162.
- [4] C. Vergez, X. Rodet, "New algorithm for nonlinear propagation of a sound wave. Application to a physical model of a trumpet.", *Journal of Signal Processing*, 2000, Volume 4, numéro 1, pp. 79-87. (Special issue on nonlinear signal processing).
- [5] C. Vergez, X. Rodet, "Trumpet and trumpet player : a highly nonlinear interaction studied in the framework of nonlinear dynamics", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2001, Volume 11, numéro 7, pp. 1801-1814
- [6] C. Vergez, A. Almeida, R. Caussé, X. Rodet, "Simple physical modeling of double-reed musical instruments : influence of aero-dynamical losses in the reed on the coupling between the reed and the bore of the resonator", *Acta Acustica united with Acustica*, 2003 Volume 89, pp. 964-973
- [7] S. Farner, C. Vergez, J. Kergomard et A. Lizee, "Contribution to harmonic balance calculations of self-sustained periodic oscillations with focus on single-reed instruments", *J. Acoust. Soc. Am.*, 2006, Volume 119, pp. 1794-1804.
- [8] A. Almeida , C. Vergez et R. Caussé, "Quasistatic nonlinear characteristics of double-reed instruments", *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, Volume 121(1), pp. 536-546.
- [9] A. Almeida , C. Vergez et R. Caussé, "Experimental investigation of reed instrument functioning through image analysis of reed opening", *Acta Acustica united with Acustica*, 2007, Volume 93(4), pp. 645-658.
- [10] P. de la Cuadra, C. Vergez et B. Fabre, "Visualization and Analysis of Jet Oscillation under Transverse Acoustic Perturbation", *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 2007, Volume 14(4), pp. 355-374.
- [11] F. Silva, J. Kergomard, C. Vergez et J. Gilbert, "Interaction of reed and acoustic resonator in clarinet-like systems", *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, Volume 124 (5), pp. 3284-3295, 2008.
- [12] D. Noreland, S. Bellizzi, C. Vergez et R. Bouc, "Nonlinear modes of clarinet-like musical instruments", *Journal of Sound and Vibration*, Volume 324, pp. 243-262, 2009.
- [13] B. Cochelin et C. Vergez, "A high order purely frequential harmonic balance formulation for continuation of periodic solutions ", *Journal of Sound and Vibration*, Volume 324, pp. 983-1002, 2009.
- [14] B. Ricaud, Ph. Guillemain, J. Kergomard, F. Silva et C. Vergez, "Behavior of reed woodwind instruments around the oscillation threshold", *Acta Acustica united with Acustica*, Volume 95(4), pp. 733-743, 2009.

- [15] Ph. Guillemain, C. Vergez, D. Ferrand, A. Farcy, "An instrumented saxophone mouthpiece and its use to inspect the strategies of an experienced player.", *Acta Acustica united with Acustica*, accepté pour publication, numéro spécial, 2010.
- [16] D. Ferrand, C. Vergez, B. Fabre, F. Blanc "High-precision regulation of a pressure controlled artificial mouth : the case of recorder-like musical instruments", *Acta Acustica united with Acustica*, accepté pour publication, numéro spécial, 2010.

Contribution à un ouvrage (avec comité de lecture)

- [17] C. Vergez et P. Tisserand, "The Brass project, from physical models to virtual musical instruments : playability issues", *Lecture Notes in Computer Science (LNCS 3902)*, Kronland-Martinet, Voinier, Ystad Eds. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 24-33, 2006.

Revue sans comité de lecture

- [18] C. Vergez et X. Rodet, "Trompette et trompettiste : étude d'un système dynamique non linéaire musical", *SCIENCES*, Avril 2001 (article invité)
- [19] X. Boutillon, J. Gilbert, C. Vergez, "Dix ans d'acoustique musicale", *Acoustique et techniques*, numéro spécial publié à l'occasion du dixième anniversaire de la revue, numéro 42-43, 2005 (article invité).
- [20] C. Vergez et D. Ferrand, "De la bouche artificielle ... au musicien artificiel ?", *Pour la Science*, numéro spécial "Sons et Musique", pp. 64-68, novembre 2008.
- [21] T. Hélie et C. Vergez, "Des instruments de musique virtuels", *Pour la Science*, numéro spécial "Sons et Musique", pp. 70-77, novembre 2008.

Conférence plénière invitée

- [22] C. Vergez, T. Hélie, "Virtual Acoustical Musical Instruments", *SCI'2001 (Systemics Cybernetics and Informatics)*, Orlando, 07/2001
- [23] B. Cochelin, C. Vergez, "Computation of periodic solutions with a high order harmonic balance method in MANLAB", 10th conference on dynamical systems theory and applications, Poland, 12/2009.

Conférences invitées dans des congrès

- [24] C. Vergez, X. Rodet, "Trumpet and trumpet player : physical modeling in a musical context", *International Congress of Acoustics (ICA)*, 2001, CDROM n°IV, Rome.
- [25] C. Vergez, A. Almeida, "Modèle physique simple d'instrument de musique à anche double : influence des pertes aéro-dynamiques dans l'anche sur le couplage anche-résonateur", *Congrès Français d'Acoustique (CFA)*, 2002, Lille.
- [26] C. Vergez, R. Caussé, E. Humbert, O. de Lajudie, "Some considerations on sound synthesis of piano hammer/string collision", *Congrès européen d'acoustique (Forum Acusticum)*, Sept. 2002, Séville, Espagne.

- [27] A. Almeida, C. Vergez, R. Caussé, "Experimental Investigations on Double Reed Quasi-Static Behavior", International Congress on acoustics (ICA), pp 1229-1232, Kyoto, Japan, 2004.

Actes de congrès

- [28] X. Rodet, C. Vergez, "Physical models of trumpet-like instruments. Detailed behaviour and model improvements", International Computer Music Conference (ICMC), pp 448-453, 1996, Hong-Kong.
- [29] C. Vergez, X. Rodet, "Model of the trumpet functioning : real time simulation and experiments with an artificial mouth", International Symposium on Musical Acoustics (ISMA), pp. 425-432, 1997, Edinburgh, Scotland.
- [30] C. Vergez, X. Rodet, "Comparison of real trumpet playing, latex model of lips and computer model", International Computer Music Conference (ICMC), pp 180-187, 1997, Thessalonike, Greece.
- [31] M. Wanderley, M. Battier, Ph. Depalle, S. Dubnov, V. Hayward, F. Iovino, V. Larcher, M. Malt, P. Pierrot, J. B. Rovin, and C. Vergez, "Gestural Research at IRCAM : A Progress Report", Journées d'Informatique Musicale (JIM), 1998, p D2.1-D2.8, Agelonde La Londeles-Maures, France.
- [32] C. Vergez, X. Rodet, "Experiments With An Artificial Mouth For Trumpet", International Symposium on Musical Acoustics (ISMA), pp 153-158, 1998, Leavenworth, Washington State, USA.
- [33] C. Vergez, X. Rodet, "Bifurcation Sequence in a Physical Model of Trumpet-like Musical Instruments : From a Fixed Point to Chaos", Nonlinear Oscillation Theory and its Applications (NOLTA), 1998, volume 2, pages 751-754, Crans-Montana, Switzerland.
- [34] T. Hélie, C. Vergez, J. Lévine, X. Rodet, "Inversion of a physical model of trumpet", International Computer Music Conference (ICMC), 1999, pp 149-152, Pékin, China.
- [35] S. Serafin, C. Vergez, X. Rodet, "Friction and Application to Real-time Physical Modelling of a Violin", International Computer Music Conference (ICMC), 1999, pp 216-219, Pékin, China.
- [36] T. Hélie, C. Vergez, J. Lévine, X. Rodet, "Inversion of a physical model of a trumpet", Conference on Decision and Control (CDC), pp 2593-2598, 1999, Phoenix, USA.
- [37] C. Vergez, X. Rodet, "Air Flow Related Improvements for Basic Physical Models of Brass Instruments", International Computer Music Conference (ICMC), pp 62-65, 2000, Berlin, Germany.
- [38] J. Bensoam, N. Misdariis, C. Vergez, R. Caussé "Integral formalism and finite element methods applied to sound synthesis by physical modeling", International Congress of Acoustics (ICA), 2001, CDROM n°IV, Rome.
- [39] G. Lemaitre, C. Vergez, X. Rodet, "Physical modeling of oboe-like instruments : influence of the bore conicity and of the pipeneck after the double reed", Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI), 2001, volume X, pp. 563-566 Orlando, USA.

- [40] J. Bensoam, N. Misdariis, C. Vergez, R. Caussé, "Finite element method for sound and structural vibration : musical application with Modalys, sound synthesis program based on modal representation", Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI), 2001, volume X, pp. 525-528 Orlando, USA.
- [41] C. Vergez, X. Rodet, "Trumpet and trumpet player : model and simulation in a musical context", International Computer Music Conference (ICMC), 2001, Cuba.
- [42] T. Hélie, C. Vergez, X. Rodet, "Virtual Musical Instruments : contribution to physical modeling and control of self-sustained instruments", Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI), 2001, volume X, pp. 547-550, Orlando, USA.
- [43] J. Bensoam, N. Misdariis, C. Vergez, R. Caussé, "Formalisme intégral et techniques numériques appliqués à la synthèse sonore par modèle physique", Congrès Français de Mécanique (CFM), 2001, Nancy.
- [44] J. Bensoam, N. Misdariis, R. Caussé, C. Vergez, "Formulation intégrale et technique des éléments finis appliquées à la synthèse sonore par modèles physiques", Congrès Français d'Acoustique (CFA), 2002, Lille.
- [45] A. Almeida, C. Vergez, R. Caussé, X. Rodet, "Etude des écoulements dans les instruments à vent à anche double pour application à la synthèse sonore.", Congrès Français d'Acoustique (CFA), 2002, Lille.
- [46] R. Caussé, C. Vergez, B. Fabre, C. Ségoufin, P. de la Cuadra, "Developing experimental techniques and physical modeling for ethnomusicology project on Ouldémé flutes", congrès européen d'acoustique (Forum Acusticum), Sept. 2002, Séville, Espagne.
- [47] De la Cuadra P., Vergez C., Caussé R., "Use of physical-model synthesis for developing experimental techniques in ethnomusicology. The case of the Ouldémé flute", International Computer Music Conference (ICMC), Sept 2002, Göteborg, Suède.
- [48] A. Almeida, C. Vergez, R. Caussé, X. Rodet, "Experimental research on double reed physical properties", Stockholm Musical Acoustic Conference (SMAC), pp. 243-246, 2003.
- [49] J. Kergomard, S. Divoir, S. Farner, C. Vergez, "A new method for the calculation of self-sustained oscillations : the perturbation of the Helmholtz motion", Stockholm Musical Acoustic Conference (SMAC), pp. 397-400, 2003.
- [50] J. Bensoam, R. Caussé, C. Vergez, N. Misdariis, N. Ellis, "Sound synthesis for three-dimensional objects : dynamic contact between two arbitrary elastic bodies", Stockholm Musical Acoustic Conference (SMAC), pp 369-372, 2003.
- [51] S. Farner, C. Vergez, J. Kergomard, "Convergence improvements of the harmonic balance method to obtain periodic solutions for self-sustained musical instruments", International Congress of Acoustics (ICA), pp. 1429-1432, 2004.
- [52] A. Almeida, C. Vergez, R. Caussé, X. Rodet, "Physical model of an oboe : comparison with experiments", International Symposium on Musical Acoustics (ISMA), pp 112-115, Nara, Japan, 2004.
- [53] R. Arquier, B. Cochelin, C. Vergez, "Manlab, logiciel de continuation interactif", 7^{ème} colloque national en calcul des structures, Giens, France, 2005.

- [54] C. Vergez, P. de la Cuadra, B. Fabre, "Jet motion in flute-like instruments : experimental investigation through flow visualization and image processing", Forum Acusticum, Budapest, Hungary, 2005, pp 545-549.
- [55] C. Vergez, A. Lizée, "A frequency-domain approach of harmonic balance solutions stability", Forum Acusticum, Budapest, Hungary, 2005, pp 539-543.
- [56] C. Vergez, P. Tisserand, "The BRASS Project, From Physical Models to Virtual Musical Instruments : Playability Issues", Computer Music Modeling and Retrieval 2005 (CMMR), Pisa, Italy, 2005, p 24-33.
- [57] J. Kergomard, A. Laurac, A. Lizée, B. Mallaroni et C. Vergez, "Effets de discontinuités de section sur l'impédance d'entrée d'un instrument à vent", 8ième Congrès Français d'Acoustique (Tours, avril 2006), CD-Rom, pp 861-864.
- [58] S. Bellizzi, K. Ege et C. Vergez, "Réduction d'un modèle physique de cuivre pour la synthèse sonore : approche par modes propres orthogonaux (Proper Orthogonal Decomposition)", 8ième Congrès Français d'Acoustique (Tours, Avril 2006), CD-Rom, pp 869-872.
- [59] F. Silva, V. Debut, J. Kergomard, C. Vergez, A. Deblevid et P. Guillemain, "Simulation of single reed instruments oscillations based on modal decomposition of bore and reed dynamics", International Congress on Acoustics (ICA), Madrid, 2007.
- [60] F. Silva, J. Kergomard et C. Vergez, "Oscillation thresholds for "striking outwards" reeds coupled to a resonator", International Symposium in Musical Acoustics (ISMA), Barcelonne, 2007.
- [61] D. Ferrand et C. Vergez, "Blowing machine for wind musical instrument : toward a real-time control of the blowing pressure", 16th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Ajaccio, France, 2008.
- [62] S. Carral et C. Vergez, "Frequency domain simulation of a bagpipe chanter with different tapers using the Harmonic Balance Method", NAG/DAGA international conference on acoustics, pp 882-885, Rotterdam, March 2009.
- [63] S. Karkar, B. Cochelin et C. Vergez, "A high order harmonic balance formulation : application to the periodic solutions of the reed musical instrument", ECCM 2010, as part of the minisymposium Periodic and quasi-periodic vibrations of non-linear structural systems, Paris, March 2010
- [64] D. Ferrand, C. Vergez et F. Silva, "Seuils d'oscillation de la clarinette : validité de la représentation exciteur/résonateur", 9ième Congrès Français d'Acoustique, Lyon, Avril 2010.
- [65] T. Hélie et C. Vergez, "Propagation non linéaire avec amortissement proportionnel : simulation entrée-sortie de solutions entropiques.", 9ième Congrès Français d'Acoustique, Lyon, Avril 2010.
- [66] D. Ferrand, T. Hélie, C. Vergez, B. Véricel et R. Caussé, "Bouches artificielles asservies : étude de nouveaux outils pour l'analyse du fonctionnement des instruments à vent", 9ième Congrès Français d'Acoustique, Lyon, Avril 2010.
- [67] S. Karkar, C. Vergez et B. Cochelin, "Etude systématique des régimes périodiques des instruments à anche", 9ième Congrès Français d'Acoustique, Lyon, Avril 2010.

Communications à des congrès, symposium (sans actes)

- [68] C. Vergez, J. Bensoam, N. Misdariis et R. Caussé, "MODALYS : Sound Synthesis by Non-linear Interaction Between Modal Objects", ASA 2000, USA.
- [69] D. Noreland, S. Bellizzi, R. Bouc, B. Cochelin, J. Kergomard et C. Vergez, "Analysis of the self-sustained oscillation of clarinet-like musical instruments using the nonlinear modes approach", 2nd International Conference on Nonlinear Normal Modes and Localization in Vibrating Systems (Samos, Grèce, juin 2006).
- [70] B. Cochelin, C. Vergez, "Continuation de mode non linéaire par équilibrage harmonique purement fréquentiel", journée nationale "modes non linéaires", Ecole Centrale de Lyon, novembre 2008.
- [71] J. Kergomard, P. Guillemain, F. Silva et C. Vergez, "The influence of control parameters and physical parameters on reed instrument playing", Acoustics'08, Paris, juin 2008.
- [72] B. Cochelin, C. Vergez et R. Arquier, "Continuation of periodic orbits with Manlab", Cours européens Sicon 4 : Advanced Nonlinear Dynamics and Chaotic Dynamical Systems, Lyon, Avril 2009.
- [73] B. Cochelin et C. Vergez, "MANLAB : an interactive series expansion approach for path following - Focus on harmonic balance solutions", Trends in Bifurcation Analysis : Methods and Applications (école d'été), Milan, June 2009.
- [74] B. Ricaud, Ph. Guillemain, J. Kergomard, F. Silva et C. Vergez, "Bifurcations and periodic regimes in woodwind instruments", Fluids and Elasticity, Carry-le-Rouet, June 2009.
- [75] F. Silva, D. Ferrand et C. Vergez, "Seuils d'oscillation d'un instrument de musique à anche simple : protocole expérimental et instrumentation d'une bouche artificielle.", Congrès Français de Mécanique, Marseille, Août 2009.
- [76] B. Cochelin, C. Vergez et S. Karkar, "MANLAB, an interactive series-expansion approach for continuation - Focus on periodic solutions", ESMC'09, 7th Euromech Solid Mechanics Conference, Lisbonne, Septembre 2009.
- [77] B. Ricaud, P. Guillemain, J. Kergomard, F. Silva, et C. Vergez, "Bifurcations of equilibrium points, and periodic regimes in woodwind instruments", ESMC'09, 7th Euromech Solid Mechanics Conference, Lisbonne, Septembre 2009.
- [78] B. Cochelin, C. Vergez et S. Bellizzi, "Computation of nonlinear modes using a high-order harmonic balance formulation", Euromech Colloquium 503 Nonlinear Normal Modes, Dimension Reduction and Localization in Vibrating Systems, Rome, Octobre 2009.

Brevet

- [79] "Procédé de simulation de la propagation non linéaire d'une onde acoustique, notamment dans un résonateur". (inventeurs : Vergez Christophe et Rodet Xavier), brevet délivré le 08/06/01 (N° 2792125). Ce brevet a donné lieu en 2005 à un accord de licence et est exploité commercialement par la société Arturia

Logiciels

- [80] Participation au projet MODALYS : logiciel de synthèse sonore par modélisation physique, distribué dans le cadre du Forum Ircam. Chargé de recherche et développement en 2000-2001.
- [81] Participation au projet HARMBAL : logiciel libre permettant la recherche de solutions périodiques (stables ou instables) d'un système dynamique non linéaire autonome par équilibrage harmonique (<http://www.lma.cnrs-mrs.fr/logiciels/harmbal/>). Rôle : encadrement de S. Farner, qui a écrit la première version du logiciel dans le cadre de son stage post-doctoral au LMA (01/2002 à 10/2002).
Ce logiciel est distribué sous la licence CeCILL (<http://www.cecill.info/logiciels.en.html>).
- [82] Participation au projet MANLAB (depuis 2004) : logiciel écrit par R. Arquier en thèse (dir. B. Cochelin) visant à construire les diagrammes de bifurcations de systèmes non linéaires par l'utilisation de la MAN. Ce logiciel est distribué sous licence CeCILL : <http://manlab.lma.cnrs-mrs.fr/>
- [83] Participation au projet MOREESC écrit pendant la thèse de F. Silva : logiciel permettant le calcul d'auto-oscillations dans le domaine temporel dans les instruments à anche simple. Ce logiciel est distribué sous licence CeCILL : <http://moreesc.lma.cnrs-mrs.fr/>

Autres

- [84] Prix Irène Meynieux 2000 : Prix jeune chercheur de moins de 30 ans décerné par l'AFAS (Association Française pour l'Avancement des Sciences) pour la thèse de doctorat.

Bibliographie

- [Aba95] Henry D. I. Abarbanel. *Analysis of Observed Chaotic Data*. Springer, 1995.
- [ABBC06] R. Arquier, S. Bellizzi, R. Bouc, and B. Cochelin. Two methods for the computation of non-linear modes of vibrating systems at large amplitude. *Computers and Structures*, 84(24-25) :1565–1576, 2006.
- [AC05] R. Arquier and B. Cochelin. Continuation d’orbites périodiques. In *Actes du 7^{ème} colloque national en calcul des structures*, Giens, France, 2005.
- [AG03] E.L. Allgower and K. Georg. *Introduction to Numerical Continuation Methods*. SIAM, 2003.
- [All77] D. J. Allwright. Harmonic balance and the Hopf bifurcation. In *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.*, pages 453–467, May 1977.
- [Alm06] A. Almeida. *Physics of double-reeds and applications to sound synthesis*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2006.
- [AM90] J. M. Adrien and J. Morison. MOSAIC : A Modular Program For Synthesis Using Modal Superposition. In *Modèles Physiques : Création Musicale et Ordinateur*, volume 2, pages 371–384. ACROE, 1990. Current name of MOSAIC is MODALYS).
- [Aza96] R. S. Azad. Turbulent flow in a conical diffuser : a review. *Exp. Thermal and Fluid Science*, 13 :318–337, 1996.
- [BA89] A. Barjau and J. Agulló. Calculation of the Starting Transients of a Double-reed Conical Woodwind. *Acta Informatica*, 69 :204–210, 1989.
- [Bac61] J. Backus. Vibration of the reed and the air column in the clarinet. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 33(6), 1961.
- [Bac63] J. Backus. Small vibration theory of the clarinet. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **35**, 305, 1963. and Erratum (61), 1977, 1381.
- [Bac85] J. Backus. The effect of the player’s vocal tract on woodwind instrument tone. *J. Acoust. Soc. Am.*, 78(1) :17–20, 1985.

- [BB05] S. Bellizzi and R. Bouc. A new formulation for the existence and calculation of nonlinear normal modes. *Journal of Sound and Vibration*, 287(3) :545–569, 2005.
- [BC03] S. Baguet and B. Cochelin. On the behaviour of the anm continuation in the presence of bifurcations. *Comm. In Numer. Methods in Engng*, 19(6) :459–471, 2003.
- [Bec78] D. Bechert. Die Steuerung eines ebenen turbulenten Freistrahls durch eine seitliche Wechselströmung erzeugt in einem Schallfeld. *Z.Flugwiss*, 24 :25–33, 1978.
- [Bec88] D. Bechert. Excitation of instability waves in free shear layers, part I. Theory. *J. Fluid Mech.*, 186 :47–62, 1988.
- [BF65] A. H. Benade and J. W. French. Analysis of the flute head joint. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 37 :679–691, 1965.
- [BG96] X. Boutillon and V. Gibiat. Evaluation of the acoustical stiffness of saxophone reeds under playing conditions by using the reactive power approach. *J. Acoust. Soc. Am.*, 100 :1178–1189, 1996.
- [BGKMY10] M. Barthet, P. Guillemain, R. Kronland-Martinet, and S. Ystad. From clarinet control to timbre perception. *Acta Acustica united with Acustica*, 2010. (accepted for publication).
- [BH85] A. Benade and P. Hoekje. Vocal tract effects in wind instrument regeneration. *J. Acoust. Soc. Am. Suppl*, 71(1) :591, 1985.
- [Bil09] S. Bilbao. *Numerical Sound Synthesis : Finite Difference Schemes and Simulation in Musical Acoustics*. John Wiley and Sons, 2009.
- [Bla09] François Blanc. *Production de son par couplage écoulement/résonateur acoustique : étude de paramètres de facture de flûtes par expérimentations et simulations numériques d'écoulement*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2009.
- [Ble01] R.D. Blevins. *Flow-induced vibration*. Krieger Publishing, 2001. 2nd edition.
- [Bou29a] H. Bouasse. *Instruments à Vent*. Delgrave, 1929. ré-édité par Blanchard (Paris, 1986).
- [Bou29b] H. Bouasse. *Tuyaux et Résonateurs*. Delgrave, 1929.
- [BPV88] P. Bergé, Y. Pomeau, and Ch. Vidal. *L'Ordre dans le Chaos*. Hermann Editeur des Sciences et des Arts, 1988. Nouvelle édition en 1995.
- [Bri88] K. H. Brink. On the effect of bottom friction on internal waves. *Continental Shelf Research*, 8(4) :387–403, 1988.
- [CDPF07] Bruno Cochelin, Nouredine Damil, and Michel Potier-Ferry. *Méthode Asymptotique Numérique*. Lavoisier, 2007.

- [CGC00] J. S. Cullen, J. Gilbert, and D. M. Campbell. Brass instruments : linear stability analysis and experiments with an artificial mouth. *Acta Informatica*, 86(4) :704–724, July/August 2000.
- [Chr03] R. M. Christensen. *Theory of Viscoelasticity*. Dover, 2nd edition, 2003.
- [CKL84] R. Caussé, J. Kergomard, and X. Lurton. Input Impedance of brass musical instruments. Comparison between experiment and numerical models. *J. Acoust. Soc. Am.*, 75 :241–254, 1984.
- [CLA90] Olivier Calvet, Ronan Laurens, and Jean Marie Adrien. Modal Synthesis Compilation of Mechanical Sub-Structures and Acoustical Sub-Systems. In *Proceedings of ICMC'90*, page 57 :59, Glasgow, 1990. ICMA.
- [CLG98] A. Cardona, A. Lerusse, and M. G  radin. Fast fourier nonlinear vibration analysis. *Computational Mechanics*, 22 :128–142, 1998.
- [Coc05] B. Cochelin. Continuation interactive de diagrammes de bifurcations complexes. In *Actes du 17  me Congr  s Fran  ais de M  canique*, Troyes, 2005.
- [Col68] Coltman. Sounding mechanism of the flue and organ pipe. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 44(4) :983–992, 1968.
- [Cou09] F. Coulouvrat. A quasi-analytical shock solution for general nonlinear progressive waves. *Wave Motion*, 46 :97–107, 2009.
- [CR78] M. C. Crandall and P. H Rabinowitz. *The Hopf bifurcation theorem in infinite dimensions*, volume 67. Arch. Rat. Mech. Anal., 1978. p 53-72.
- [Cri79] D. G. Crighton. Model equations of nonlinear acoustics. *Ann. Rev. Fluid Mech*, 11 :11–33, 1979.
- [CTH82] P. Clinch, G. Troup, and L. Harris. The importance of the vocal tract resonance in clarinet and saxophone performance : A preliminary account. *Acustica*, 50 :280–284, 1982.
- [Dal01] J.P. Dalmont. Acoustic impedance measurement, part i : A review. *Journal of Sound and Vibration*, 243(3) :437–439, 2001.
- [DC07] M. Demoucron and R. Causs  . Sound synthesis of bowed string instruments using a gesture based control of a physical model. In *Proceedings of International Symposium on Musical Acoustics*, 2007.
- [Deb04] V. Debut. *Two studies of a clarinet-like musical instrument : analysis of the eigen frequencies and calculation of the self-sustained oscillations by modal decomposition*. PhD thesis, Universit   : Aix Marseille 2, 2004. (in french), <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00008711/en/>
- [DF07] J.P. Dalmont and C. Frapp  . Oscillation and extinction thresholds of the clarinet : Comparison of analytical results and experiments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 122(2) :1173–1179, 2007.

- [DGKO05] J.P. Dalmont, J. Gilbert, J. Kergomard, and S. Ollivier. An analytical prediction of the oscillation and extinction thresholds of a clarinet. *J. Acoust. Soc. Am.*, 118(5) :3294–3296, Nov. 2005.
- [DGO03] J. P. Dalmont, J. Gilbert, and S. Ollivier. Nonlinear characteristics of single-reed instruments : quasi-static volume flow and reed opening measurements. *J. Acoust. Soc. Am.*, 114(4) :2253–2262, 2003.
- [dNCH10] B. d’Andréa Novel, J.M. Coron, and Th. Hélie. Asymptotic state observers for a simplified brass instrument model. *Acta Informatica*, 2010. (à paraître).
- [DO09] E. J. Doedel and B. E. Oldeman. *AUTO-07P : Continuation and Bifurcation Software for Ordinary Differential Equations*. Concordia University, Montreal, Canada, 2009.
- [Doe81] E.J. Doedel. Auto : A program for automatic bifurcation analysis of autonomous systems. *Congressus Numerantium*, 30 :265–284, 1981.
- [DR09] M. Demoucron and N. Rasamimanana. Score based real-time performance with a virtual violin. In *DAFx*, Milan, Italie, 2009.
- [DSW07] P. Dickens, J. Smith, and J. Wolfe. Improved precision in measurements of acoustic impedance spectra using resonance-free calibration loads and controlled error distribution. *J. Acoust. Soc. Am.*, 121(3) :1471–1481, 2007.
- [DvGLW95] O. Dieckmann, S. A. van Gils, S. M. Verduyn Lunel, and H. O. Walther. *Delay equations. Functional, Complex and Nonlinear Analysis*, volume 110 of *Applied mathematical sciences*. Springer-Verlag, 1995.
- [EB82] S. J. Elliott and J. M. Bowsher. Regeneration in Brass Wind Instruments. *Journal of Sound and Vibration*, 83(2) :181–217, 1982.
- [Fab08] B. Fabre. *Acoustique des instruments de musique*, chapter 10 : Les instruments de la famille des flûtes. Belin, 2008.
- [FFK04] C. Fritz, S. Farner, and J. Kergomard. Some aspects of the harmonic balance method applied to the clarinet. *Applied acoustics*, 65 :1155–1180, 2004.
- [FH00] B. Fabre and A. Hirschberg. Physical modeling of flue instruments : a review of lumped models. *Acta Acustica*, 86 :599 :610, 2000.
- [FL87] X.X. Wu F.H. Ling. Fast galerkin method and its application to determine periodic solutions of non-linear oscillators. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 22 :89–98, 1987.
- [Fle79] N. H. Fletcher. Excitation mechanism in woodwind and brass instruments. *ACUSTICA*, 43 :63–72, 1979.
- [Fou97] Th. Foucart. *L’Analyse des données : Mode d’emploi, méthodes et études de cas*. Presses Universitaires de Rennes 2, 1997.

- [Fra08] V. François. Comportement du jet dans une flûte : influence de la géométrie du canal sur le couplage entre le jet et le champ acoustique. Master's thesis, Supaéro - Université de Toulouse, 2008.
- [Fri05] C. Fritz. *La clarinette et le clarinettiste : influence du conduit vocal sur la production du son*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie and New South Wales, 2005.
- [GGA95] B. Gazengel, J. Gilbert, and N. Amir. Time domain simulation of single reed wind instrument. From the measured input impedance to the synthesis signal. Where are the traps? *Acta Informatica*, pages 445–472, 1995.
- [GGL96] N. Grand, J. Gilbert, and F. Laloë. Oscillation threshold of woodwinds instruments. *Acta Acustica*, 82 :137–151, 1996.
- [Gib88] V. Gibiat. Phase space representation of acoustic musical signals. *Journal of Sound and Vibration*, 123(3) :529–536, 1988.
- [GKN89] J. Gilbert, J. Kergomard, and E. Ngoya. Calculation of the Steady-State Oscillations of a clarinet using the Harmonic Balance Technique. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 86(1) :35–41, 1989.
- [GKV05] Ph. Guillemain, J. Kergomard, and Th. Voinier. Real-time synthesis of clarinet-like instruments using digital impedance models. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 118(1) :483–494, 2005.
- [GLD10] J. Gilbert, L. Libouban, and J.P. Dalmont. La clarinette cuivre-t-elle ? pertinence de la prise en compte des phénomènes de propagation non-linéaires pour la modélisation de la clarinette. In *Actes du CFA10*, 2010.
- [Gon01] A. Goncalves. Stabilité des régimes d'oscillations périodiques d'instruments à vent. analyse par équilibrage harmonique. Master's thesis, 2001.
- [GP83] P. Grassberger and I. Procaccia. Characterization of strange attractors. *Physical Review Letters*, 50(5) :346–349, 1983.
- [GP97] J. Gilbert and J. F. Petiot. Nonlinéarités dans les instruments de type cuivre : résultats expérimentaux. In *Actes de Colloque du quatrième Congrès Français d'Acoustique, Marseille*, 1997.
- [GS10] Ph. Guillemain and F. Silva. De l'utilisation de la décomposition modale pour la synthèse sonore temps-réel : écueils et solutions. In *Actes du CFA10*, 2010.
- [Gui] Ph. Guillemain. (article en préparation).
- [Gui04] Ph. Guillemain. A digital synthesis model of double-reed wind instruments. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2004(7) :990–1000, 2004.
- [Gui07] Ph. Guillemain. Some roles of the vocal tract in clarinet breath attacks : Natural sounds analysis and model-based synthesis. *J. Acoust. Soc. Am.*, 121(4) :2396–2406, 2007.

- [GV03] Ph. Guillemain and Th. Voinier. *Lecture Notes on Computer Science*, volume 2771, chapter Characterization of musical performance using Physical Sound Synthesis Models, pages 64–73. Kock-Wiil Ed., Springer-Verlag, 2003.
- [GV04] Philippe Guillemain and Thierry Voinier. Characterization of musical performance using physical sound synthesis models. *Lecture Notes on Computer Sciences*, 2771 :64–73, 2004.
- [HB98] M. F. Hamilton and D. T. Blackstock, editors. *Nonlinear Acoustics*. Academic Press, 1998.
- [Hel77] H. L. F. Helmholtz. *"On the sensation of tone"*. Masson, 1877. Reprinted by Dover, from the first edition in 1954.
- [HGMW96] A. Hirschberg, J. Gilbert, R. Msallam, and A. P. J Wijnands. Shock waves in trombones. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 99(3) :1754–1758, 1996.
- [HGWV94] A. Hirschberg, J. Gilbert, A. P. J. Wijnands, and A. M. C. Valkering. Musical aero-acoustics of the clarinet. *Journal de Physique IV*, 4 :C5–559 :C5–568, 1994. Colloque C5 supplément au Journal de Physique III.
- [HHK69] W.D. Hayes, R.C. Haefeli, and H.E. Kulsrud. Sonic boom propagation in a stratified atmosphere with computer program. Technical Report CR-1299, NASA, 1969.
- [Hir95] A. Hirschberg. *Mechanics of Musical Instruments*, chapter 7 : Aero-acoustics of Wind Instruments, pages 229–290. Springer-Verlag, 1995.
- [HKW95] A. Hirschberg, J. Kergomard, and G. Weinreich, editors. *Mechanics of Musical Instruments (Chap. 6, J. Kergomard)*, chapter Elementary considerations on reed-instrument oscillations. Springer Verlag, 1995.
- [Hop42] E. Hopf. *Bifurcation of a periodic solution from a stationary solution of a system of differential equations*, volume 95. Ber. Verh. Sach. Akad. Wiss. Leipzig, 1942.
- [HPS05] C. Homescu, L.R. Petzold, and R. Serban. Error estimation for reduced-order models of dynamical systems. *SIAM J. Numer. Anal.*, 43(4) :1693–1714, 2005.
- [HR71] L. Hiller and P. Ruiz. Synthesizing musical sounds by solving the wave equation for vibrating objects. *J. Audio Eng. Soc.*, 19(6 (part I), 7 (part II)), 1971.
- [HS08] Th. Helie and V. Smet. Simulation of the weakly nonlinear propagation in a straight pipe : application to a real-time brassy audio effect. In *Mediterranean Conference on Control and Automation*, pages 1580–1585, 2008.
- [Ing89] L. Ingber. Very fast simulated re-annealing. *J. Math. Comput. Modelling*, 12 :967–973, 1989.
- [JOS04] Julius Orion Smith. Virtual acoustic musical instruments : Review and update. *Journal of New Music Research*, 33(3) :283–304, 2004.

- [KDM06] J. Kergomard, V. Debut, and D. Matignon. Resonance modes in a one-dimensional medium with two purely resistive boundaries. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 119(3) :1356–1367, 2006.
- [Kee92] D. H. Keefe. Physical Modelling of Wind Instruments. *Comput. Music J.*, 16(4) :57–73, 1992.
- [Ker97] J. Kergomard. Instruments de musique à vent : Comment éviter le chaos pour faire de la musique ? *Acoustique et Techniques*, (9) :15–22, 1997.
- [KFG03] G. Kerschen, B.F. Feeny, and J.C. Golinval. On the exploitation of chaos to build reduced-order models. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192 :1785–1795, 2003.
- [KGVB05] G. Kerschen, J.C. Golinval, A.F. Vakakis, and L.A. Bergman. The method of proper orthogonal decomposition for dynamical characterization and order reduction of mechanical systems : an overview. *Nonlinear Dynamics*, 41 :147–169, 2005.
- [KOG00] J. Kergomard, S. Ollivier, and J. Gilbert. Calculation of the spectrum of self-sustained oscillators using a variable truncation method : Application to cylindrical reed instruments. *Acta Acustica united with Acustica*, 86(4) :685–703, 2000.
- [KOGV07] B. Krauskopf, H. M. Osinga, and J. Galan-Vioque, editors. *Numerical Continuation Methods for Dynamical Systems*. Springer, 2007.
- [Kor90] S. V. Korsunskii. Propagation of finite-amplitude sound beams in electrically conducting media. *Sov. Phys. Acoust.*, 36 :25–27, 1990.
- [KS64] R. V. Khokhlov and S. I. Soluyan. Propagation of acoustics waves of moderate amplitude through dissipative and relaxing media. *Acustica*, 14 :241–247, 1964.
- [Lev94] R. J. Leveque. CLAWPACK A Software Package for Solving Multi-Dimensional Conservation Laws. In *Proc. of the 5th International Conference on Hyperbolic Problems*, Stony Brook, June 1994.
- [LHvH⁺06] I. Lopez, A. Hirschberg, A. van Hirtum, N. Rutty, and X. Pelorson. Physical modeling of buzzing artificial lips : The effect of acoustic feedback. *Acta Acustica united with Acustica*, 92 :1047–1059, 2006.
- [MAFG⁺03] F.J. Muñoz-Almaraz, E. Freire, J. Galán, E. Doedel, and A. Vanderbauwhede. Continuation of periodic orbits in conservative and hamiltonian systems. *Physica D*, 181 :1–38, 2003.
- [Man04] P. Manneville. *Instabilités, Chaos et Turbulence*. Les Editions de l'Ecole Polytechnique, 2004.
- [MC71] G. Mattingly and W. Criminale. Disturbance characteristics in a plane jet. *Phys. Fluids*, 14 :2258–2264, 1971.

- [MC79] A. I. Mees and L. O. Chua. The Hopf bifurcation theorem and its applications to nonlinear oscillations in circuits and systems. *IEEE Trans. Circuits and Systems*, cas-26(4) :235–254, April 1979.
- [MC98] N. Misdariis and R. Caussé. Design sonore de la voiture électrique TULIP. Technical report, Ircam, 1998. Document interne.
- [MDCT00] R. Msallam, S. Dequidt, R. Caussé, and S. Taasart. Physical model of the trombone including nonlinear effects. application to the sound synthesis of loud tones. *Acta Acustica united with Acustica*, 2000.
- [Mer87] W. Merzkirch. *Flow Visualization*. Academic press Inc, London, 1987.
- [Mey74] R. Meylan. *La Flûte*. Instruments de Musique. Payot Paris, 1974.
- [MG41] C. S. McGinnis and C. Gallagher. The mode of vibration of a clarinet reed. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 12 :529–531, 1941.
- [MO97] S. Makarov and M. Ochmann. Nonlinear and Thermoviscous Phenomena in Acoustics, Part II. *ACUSTICA - acta acustica*, 83 :197–222, 1997.
- [MSW83] M. E. McIntyre, R. T. Schumacher, and J. Woodhouse. On the oscillations of musical instruments. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 74 :1325–1345, 1983.
- [Ned98] C. J. Nederveen. *Acoustical Aspects of Musical Instruments*. Northern Illinois Univ. Press, 1998.
- [Nol98] A.W. Nolle. Sinuous instability of a planar jet : propagation parameters and acoustic excitation. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 103 :3690–3705, 1998.
- [ODK04] S. Ollivier, J.P. Dalmont, and J. Kergomard. Idealized models of reed woodwinds. Part II : on the stability of two-steps oscillations. *Acustica*, 91 :166–179, 2004.
- [PaJG10] J.F. Petiot and M.F. Lucas and J. Gilbert. Etude comparative des sons simulés et sons réels pour différentes trompettes. In *Actes du CFA10*, 2010.
- [PCG91] J. Puaud, R. Caussé, and V. Gibiat. Quasi-périodicité et bifurcations dans la note de loup. *J. Acoustique*, 4 :253 :259, 1991.
- [Pie89] A. D. Pierce. *Acoustics, an introduction to its physical principles and applications*. Acoust. Soc. Am., New York, 1989. 2nd edition.
- [Ray77] J. W. S. Rayleigh. *The theory of sound*. Dover, New York, 1877. reprinted from the first edition in 1945.
- [RCM06] D. Ruan, D.A. Castanon, and K.C. Metha. Normalized proper orthogonal decomposition (npod) for building pressure data compression. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94 :447–461, 2006.

- [RGEPTT03] Roger Grimshaw, Efim Pelinovsky, and Tatiana Talipova. Damping of large amplitude solitary waves. *Wave motion*, 37(4) :351–364, 2003.
- [Ric10] B. Ricaud. Properties of periodic solutions near their oscillation threshold for a class of hyperbolic partial differential equations with localized nonlinearity. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2010. (à paraître).
- [Ros62] R. Rosenberg. The normal modes of nonlinear n -degree-of-freedom systems. *Journal of Applied Mechanics*, 29 :7–14, 1962.
- [RPvHaILAH07] N. Rutu, X. Pelorson, A. van Hirtum and I. Lopes-Arteaga, and A. Hirschberg. An *in vitro* setup to test the relevance and the accuracy of low order vocal folds models. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 121(1) :479–490, 2007.
- [RSA⁺96] C. Roads, J. Strawn, C. Abbott, J. Gordon, and P. Greenspun. *The computer music tutorial*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, Massachussets Institue of Technology edition, 1996.
- [SCS⁺06] J. Solis, K. Chida, K. Suefuji, K. Taniguchi, S.M. Hashimoto, and A. Takani-shi. The waseda flutist robot wf-4rii in comparison with a professional flutist. *Computer Music Journal*, 30(4) :12–24, 2006.
- [SdS05] G. Scavone and A. da Silva. Frequency content of breath pressure and implications for use in control. In *Proceedings of the 2005 International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME05)*, pages 93–96, Vancouver, Canada, 2005.
- [SFdL04] C. Ségoufin, B. Fabre, and L. de Lacombe. Experimental investigation of the flue channel geometry influence on edge-tone oscillations. *Acta Acustica united with Acustica*, 90 :966–975, 2004.
- [Sil09] F. Silva. *Emergence des auto-oscillations dans les instruments à anche simple*. PhD thesis, Université de Provence, Aix-Marseille 1, 2009. tel.archives-ouvertes.fr/tel-00456719.v2/.
- [SLdS08] G. Scavone, A. Lefebvre, and A. R. da Silva. Measurement of vocal-tract influence during saxophone performance. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(4) :2391–2400, 2008.
- [Smi92] J.O. Smith. Physical modelling using digital waveguides. *Computer Music Journal*, 16(4), 1992. special issue : Physical Modeling of Musical Instruments, Part I. [http : //ccrma.stanford.edu/ jos/pmudw/](http://ccrma.stanford.edu/jos/pmudw/).
- [SP91] S. Shaw and C. Pierre. Non-linear normal modes and invariant manifolds. *Journal of Sound and Vibration*, 150(1) :170–173, 1991.
- [SP93] S. Shaw and C. Pierre. Normal modes for nonlinear vibratory systems. *Journal of Sound and Vibration*, 164(1) :85–124, 1993.

- [SS80] S.E.Stewart and W.J. Strong. Functional model of a clarinet. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 68(1) :109–120, 1980.
- [STY87] J. Saneyoshi, H. Teramura, and S. Yoshikawa. Feedback oscillations in reed woodwind and brasswind instruments. *ACUSTICA*, 62 :194–210, 1987.
- [SYTM88] Hara S., Yamamoto Y., Omata T., and Nakano M. Repetitive control system : A new type servo system for periodic exogenous signals. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 33(7) :659–668, 1988.
- [Ség00] C. Ségoufin. *Production du son par interaction écoulement/résonateur acoustique : influence du système amont, application à la flûte à bec*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2000.
- [TF80] S. Thwaites and N. Fletcher. Wave propagation on turbulent jets I. *Acustica*, 45 :175–179, 1980.
- [TF82] S. Thwaites and N. Fletcher. Wave propagation on turbulent jets II : Growth. *Acustica*, 51 :44–49, 1982.
- [TFH⁺05] A. Tarnopolsky, N. Fletcher, L. Hollenberg, B.Lange, J. Smith, and J. Wolfe. Acoustics : The vocal tract and the sound of a didgeridoo. *Nature*, 436(39), 2005.
- [TFL00] A. Z. Tarnopolsky, N. H. Fletcher, and J. C. S. Lai. Oscillating reed valves - an experimental study. *J. Acoust. Soc. Am.*, 108(1), 2000.
- [TLM⁺04] J.R. Treddice, G.L. Lippi, P. Mandel, B. Charasse, A. Chevalier, and B. Picqué. Critical slowing down at a bifurcation. *Am. J. Phys.*, 72(6) :799–809, 2004.
- [TOC04] C. Touzé, O.Thomas, and A. Chaigne. Hardening/softening behaviour in non-linear oscillations of structural systems using non-linear normal modes. *Journal of Sound and Vibration*, 273(1-2) :77–101, 2004.
- [TR03] L. Trautmann and R. Rabenstein. *Digital Sound Synthesis by Physical Modeling Using the Functional Transformation Method*. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2003.
- [Ura65] M. Urabe. Galerkin’s procedure for nonlinear periodic systems. *Arch. for Rational Mechanics and Analysis*, 20 :120–152, 1965.
- [Van97] R. Vandenhousten. SANTIS : a tool for signal analysis and time series processing. [http ://WWW.Physiology.RWTH-Aachen.DE/bs/signal/santis/](http://WWW.Physiology.RWTH-Aachen.DE/bs/signal/santis/), 1997.
- [Ver00] C. Vergez. *Trompette et trompettiste : un système dynamique non linéaire analysé modélisé et simulé dans un contexte musical*. PhD thesis, Université Paris 6, Janvier 2000.
- [vGE01] G. von Groll and D. J. Ewins. The harmonic balance method with arc-length continuation in rotor/stator contact problems. *Journal of Sound and Vibration*, 241(2) :223–233, 2001.

- [VPEK06] V. Välimäki, J. Pakarinen, C. Erkut, and M. Karjalainen. Discrete-time modelling of musical instruments. *Reports on Progress in Physics*, 69(1) :1–78, 2006.
- [VR67] E. Varley and T. G. Rodgers. The propagation of high-intensity finite acceleration pulses and shocks in viscoelastic materials. In *Proc. Roy. Soc. London*, volume A296, pages 498–518, 1967.
- [vW02] M. van Walstijn. *Discrete-time modelling of brass and woodwind instruments with application to musical sound synthesis*. PhD thesis, University of Edinburgh, 2002.
- [vWA07] M. van Walstijn and F. Avanzini. Modelling the mechanical response of the reed-mouthpiece-lip system of a clarinet. part ii : A lumped model approximation. *Acta Acustica united with Acustica*, 93(3) :435–446, 2007.
- [VXA⁺03] C. Vilain, X. Pelorson, A. Hirschberg, L. Le Marrec, W. Op’t Root, and J. Willems. Contribution to the physical modeling of the lips. influence of the mechanical boundary conditions. *Acta Acustica united with Acustica*, 89 :882–887, 2003.
- [WB74] T. A. Wilson and G. S. Beavers. Operating modes of the clarinet. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 56(2) :653–658, 1974.
- [WD04] M. Wanderley and Ph. Depalle. Gestural control of sound synthesis. *Proceedings of the IEEE*, 92(4) :632–644, 2004. Special Issue on Engineering and Music - Supervisory Control and Auditory Communication, G. Johannsen, Ed.
- [Wei80] G. Weinreich. Logiciel ”pianofortran” de synthèse sonore par modèle physique (marteau, cordes, tables d’harmonie), ircam. 1980.
- [Wei81] G. Weinreich. Synthesis of piano tones from first principles (a). *J. Acoust. Soc. Am.*, 69(S1) :S88, 1981.
- [Whi01] F. M. White. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, 4th edition, 2001.
- [Wil96] T. Wilson. The measured vocal tract impedance for clarinet performance and its role in sound production. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 99(4) :2455–2456, 1996.
- [Win] Windsynth. <http://windsynth.net/basics.html>.
- [Wor71] W. E. Worman. *Self-sustained nonlinear oscillations of medium amplitude in clarinet-like systems*. PhD thesis, Case Western Reserve University, 1971. Ann Arbor University Microfilms (ref. 71-22869).
- [YV01] S. Ystad and Th. Voinier. A virtually real flute. *Comput. Music J.*, 25(2) :13–24, 2001.

Chapitre 7

Annexe scientifique

7.1 Modélisation d'un instrument à anche simple

7.1.1 Modèle à trois équations

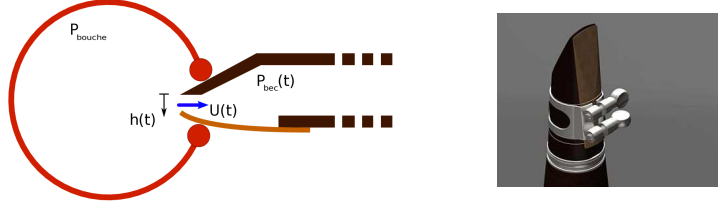


FIGURE 7.1 – **A gauche** : représentation schématique d'une clarinette insérée dans la bouche du musicien. **A droite** : bec et anche réels

Ce modèle considère que l'anche se comporte comme un oscillateur linéaire à un degré de liberté, de pulsation propre ω_r et d'amortissement q_r soumis à une différence de pression entre les deux faces de l'anche (on pose $\Delta p = p_{bouche} - p_{bec}$) avec une raideur surfacique K :

$$\begin{aligned} \frac{1}{\omega_r^2} \frac{d^2 h}{dt^2} + \frac{q_r}{\omega_r} \frac{dh}{dt} + (h(t) - h_0) &= -\frac{\Delta p(t)}{K} \quad \text{si } h \geq 0, \\ h(t) &= 0 \quad \text{sinon,} \end{aligned} \quad (7.1)$$

où h est la position de l'extrémité mobile de l'anche (h_0 la position au repos). Le débit d'air entrant s'exprime en fonction de la différence de pression Δp entre la bouche et le bec (on suppose $\Delta p \geq 0$), et la section du canal d'anche Wh (comme justifié dans [HGWW94]) :

$$\begin{aligned} u(t) &= Wh(t) \sqrt{2\Delta p / \rho} \quad \text{si } h \geq 0, \\ u(t) &= 0 \quad \text{sinon,} \end{aligned} \quad (7.2)$$

où ρ est la densité de l'air. Le corps de l'instrument agit comme un résonateur acoustique caractérisé par son impédance d'entrée (les grandeurs sont écrites dans le domaine fréquentiel) :

$$P_{bec}(\omega) = U(\omega) Z_e(\omega), \quad (7.3)$$

L'impédance d'entrée est une quantité mesurable ([Dal01], [DSW07]) et dont on peut obtenir de bonnes approximations par calcul ([CKL84]). Dans le cas simple d'un résonateur cylindrique de longueur l , approximation raisonnable d'une clarinette où tous les trous sont fermés :

$$Z_e(\omega) = j Z_c \tan kl, \quad (7.4)$$

où k est le nombre d'onde et où $Z_c = \rho c / S$, est l'impédance caractéristique des ondes planes (c vitesse des ondes acoustiques, S section d'entrée du cylindre). Le modèle dit "à trois équations" est constitué des équations (7.1), (7.2) et (7.3).

7.1.2 Modèle à deux équations

Un modèle simplifié peut être obtenu si on considère que les fréquences de jeu sont très inférieures à la fréquence de résonance d'anche. Aux fréquences de jeu, l'anche est alors dominée par son comportement en raideur et l'équation donnant la dynamique d'anche s'écrit :

$$\begin{aligned} (h(t) - h_0) &= -\frac{\Delta p(t)}{K} & \text{si } h \geq 0, \\ h(t) &= 0 & \text{sinon.} \end{aligned} \quad (7.5)$$

En remplaçant h dans l'équation (7.2), on a alors :

$$\begin{aligned} u(t) &= W \left(h_0 - \frac{\Delta p(t)}{K} \right) \sqrt{2\Delta p / \rho} & \text{si } h \geq 0, \\ u(t) &= 0 & \text{sinon.} \end{aligned} \quad (7.6)$$

L'équation (7.3) exprimant la réponse acoustique du résonateur reste inchangée et constitue avec l'équation (7.6) le modèle dit "à deux équations".

L'équation (7.6) donnant le comportement de l'excitateur est instantanée et fonction uniquement de la différence de pression de part et d'autre de l'anche Δp (qu'on suppose positif). On peut tracer facilement l'évolution du débit entrant u dans l'instrument en fonction de Δp . On obtient ce qui est souvent appelé "la caractéristique non linéaire", présentée en figure 7.2.

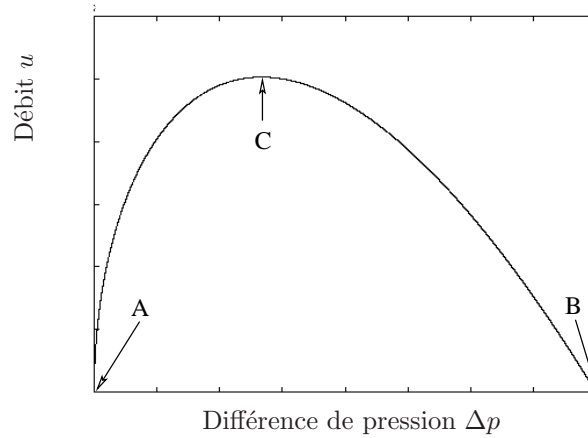


FIGURE 7.2 – Allure générale du débit entrant dans une clarinette (ou assimilé) en fonction de la différence de pression de part et d'autre de l'anche. Au point A le débit est nul car $\Delta p = 0$. Au point B le débit est nul aussi car l'anche s'est refermée : $h = 0$ car la pression de plaquage $\Delta p_M = Kh_0$ est atteinte. Au point C le débit est maximal, pour une différence de pression $\Delta p = \frac{1}{3}\Delta p_M$.

7.1.3 Décomposition modale (modes réels ou complexes)

Nous ne donnons que l'essentiel des éléments, mais plus de détails sont fournis dans la thèse de F. Silva ([Sil09, chap. 6]).

Modes réels : Nous avons montré dans [59] comment le modèle à trois équations pouvait être formulé en décomposant la pression p_{bec} sur les modes réels du résonateur.

Ecrivons l'impédance d'entrée du tube, sous la forme :

$$Z_e(\omega) = \sum_{n=1}^N Z_n \frac{j q_n \omega \omega_n}{\omega_n^2 + j q_n \omega \omega_n - \omega^2}, \quad (7.7)$$

où N est le nombre de modes retenu. Chaque résonance est ainsi caractérisé par une amplitude Z_n , une pulsation ω_n et un amortissement q_n . Il est possible d'associer à chaque mode une composante du champ de pression en entrée de l'instrument :

$$p_{bec}(t) = \sum_{n=1}^N p_n(t) \quad (7.8)$$

qui vérifie l'équation différentielle obtenue par transformation inverse de l'impédance :

$$\forall n, \ddot{p}_n + q_n \omega_n \dot{p}_n + \omega_n^2 p_n(t) = Z_n q_n \omega_n \dot{u}. \quad (7.9)$$

Modes complexes : Pour gagner en généralité, ce sont les modes complexes qui sont utilisés finalement dans la thèse de F. Silva ([Sil09]) et dans le logiciel MOREESC ([82]). L'impédance est alors écrite :

$$Z_e(\omega) = \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{j\omega - s_n} + \frac{C_n^*}{j\omega - s_n^*}, \quad (7.10)$$

où N est le nombre de mode retenu, les s_n sont les pôles complexes et les C_n les résidus de l'impédance d'entrée. La pression $p_{bec}(t)$ se décompose en :

$$p_{bec}(t) = 2 \sum_{n=1}^N \mathcal{Re}(p_n(t)), \quad (7.11)$$

où p_n est la composante (complexe) de la pression dont le comportement dynamique est lié au pôle s_n et au résidu C_n :

$$P_n(\omega) = \frac{C_n}{j\omega - s_n} U(\omega), \quad (7.12)$$

ce qui en temporel s'écrit :

$$\dot{p}_n - s_n p_n(t) = C_n u(t). \quad (7.13)$$

7.1.4 Modèle de clarinette de Raman

Equations du modèle

C'est sans doute le modèle le plus simple d'instrument à anche. Les deux approximations principales sont :

- On néglige la dynamique de l'anche (comme dans le modèle à deux équations, paragraphe 7.1.2).
- Le résonateur est un cylindre, et les pertes sont considérées indépendantes de la fréquence.

On pourra trouver dans [ODK04] une discussion détaillée sur le modèle, mais nous repartons directement de leurs équations (1) et (15) :

$$\begin{cases} p_n &= u_n + \lambda(p_{n-a} + u_{n-a}) & (7.14a) \\ u_n &= \zeta(1 - \gamma + p_n)\sqrt{\gamma - p_n} & (7.14b) \\ &\text{si } 1 - \gamma + p_n > 0 \\ u_n &= 0 & \text{si } 1 - \gamma + p_n \leq 0 & (7.14c) \end{cases} \quad (7.14)$$

où p_n (resp. p_{n-a}) est la pression dans le bec au temps t_n (resp. t_{n-a}), u_n (resp. u_{n-a}) est le débit entrant dans l'instrument au temps t_n (resp. t_{n-a}), $\lambda = -\exp(-2\alpha L)$ contrôle la quantité de pertes acoustiques, $\gamma = p_b/p_M$ est la pression dans la bouche adimensionnée par la pression de plaquage et $\zeta = (Hw/S)\sqrt{2\rho c^2/p_M}$ représente la manière dont l'anche est pincée par le musicien.

On s'intéresse à l'étude du premier registre, dont on sait qu'il s'établit à la fréquence de jeu $f = c/4l$ si c est la vitesse du son et l la longueur du cylindre. Aussi, en considérant une fréquence d'échantillonnage $f_e = c/2l$ on peut écrire $a = 1$ dans l'équation (7.14a). En éliminant le débit des équations, le modèle de Raman se ramène à une unique équation :

$$p_n = \zeta(1 - \gamma + p_n)H(1 - \gamma + p_n)\sqrt{\gamma - p_n} + \lambda [p_{n-1} + \zeta(1 - \gamma + p_{n-1})H(1 - \gamma + p_{n-1})\sqrt{\gamma - p_{n-1}}] \quad (7.15)$$

où H est la fonction de Heaviside

Valeurs des paramètres (cf. [DGKO05]) : Les pertes acoustiques $\alpha L = 0.025$ sont ajustées de manière à approcher celles d'un cylindre (longueur 0.5m, diamètre $16e^{-3}$ m) à sa première fréquence de résonance.

Comment rendre ces équations quadratiques ?
(pour utilisation de la MAN, paragraphe 4.4.3, p84)

L'astuce principale consiste à remplacer $xH(x)$ par $1/2(x + \sqrt{x^2})$, comme illustré en figure 7.3.

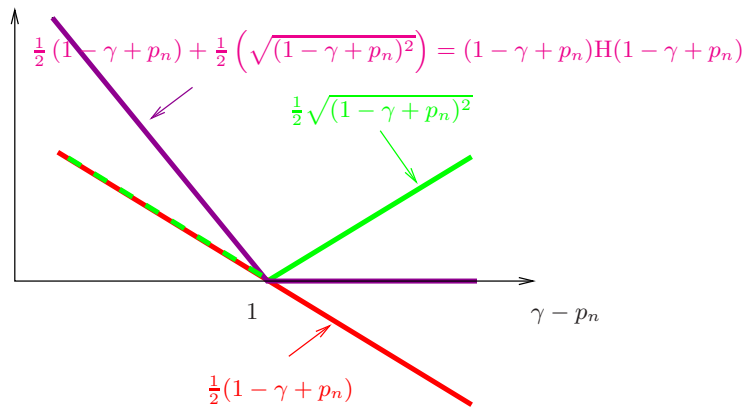


FIGURE 7.3 – Illustration du principe de la ré-écriture de $(1 - \gamma + p_n)H(1 - \gamma + p_n)$ sous forme quadratique

L'équation (7.15), écrite pour les N_p échantillons de la solutions forme le système à résoudre :

$$\begin{cases} p_n = \zeta \left[\frac{1}{2} (1 - \gamma + p_n) + \frac{1}{2} \left(\sqrt{(1 - \gamma + p_n)^2} \right) \right] \sqrt{\gamma - p_n} + \\ \lambda \left(p_{n-1} + \zeta \left[\frac{1}{2} (1 - \gamma + p_{n-1}) + \frac{1}{2} \left(\sqrt{(1 - \gamma + p_{n-1})^2} \right) \right] \sqrt{\gamma - p_{n-1}} \right) \\ \forall 2 \leq n \leq N_p \\ p_1 = \zeta \left[\frac{1}{2} (1 - \gamma + p_1) + \frac{1}{2} \left(\sqrt{(1 - \gamma + p_1)^2} \right) \right] \sqrt{\gamma - p_1} + \\ \lambda \left(p_{N_p} + \zeta \left[\frac{1}{2} (1 - \gamma + p_{N_p}) + \frac{1}{2} \left(\sqrt{(1 - \gamma + p_{N_p})^2} \right) \right] \sqrt{\gamma - p_{N_p}} \right) \end{cases} \quad (7.16)$$

La dernière équation est la condition de périodicité : l'itéré du dernier échantillon d'une période du signal redonne le premier échantillon. On peut vérifier que ce système se met bien sous la forme requise par MANLAB donnée par l'équation (4.7) p80, avec comme vecteur d'inconnu :

$$\mathbf{U} = [p_1, \dots, p_{N_p}, \sqrt{\gamma - p_1}, \dots, \sqrt{\gamma - p_{N_p}}, \\ z_1 \triangleq \sqrt{(1 - \gamma + p_1)^2}, \dots, z_n \triangleq \sqrt{(1 - \gamma + p_{N_p})^2}, \gamma] \quad (7.17)$$

7.2 Modèle de cuivre utilisé dans les §3.2.1 et §4.2.2

Par rapport au modèle d'instrument à anche à trois équations établi au §7.1.1, une simple modification permet de décrire le fonctionnement des cuivres : une différence de pression Δp positive tend à ouvrir les lèvres (alors qu'elle a tendance à refermer le canal d'anche). Les lèvres étant assimilées à un oscillateur à un degré de liberté :

$$\begin{aligned} \frac{1}{\omega_r^2} \frac{d^2 h}{dt^2} + \frac{q_r}{\omega_r} \frac{dh}{dt} + (h(t) - h_0) &= \frac{\Delta p(t)}{K} & \text{si } h \geq 0 \\ h(t) &= 0 & \text{sinon} \end{aligned} \quad (7.18)$$

Les notations sont les mêmes qu'à l'équation (7.1), mais l'anche est maintenant une anche lippale, selon la dénomination introduite par Bouasse ([Bou29a]). Les équations (7.2) et (7.3) complètent le modèle de cuivre.

Deuxième partie

Parcours du candidat

Chapitre 8

Curriculum Vitae

CHRISTOPHE VERGEZ**Chercheur CNRS (CR1)**

Laboratoire de Mécanique et Acoustique, UPR 7051

31 Chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20

Tel : 04.91.16.41.63 | mél : vergez@lma.cnrs-mrs.fr

Né le 19.10.71

Formation Universitaire

- 1995-1999 : Thèse ATIAM (Paris 6) réalisée à l'*Ircam* (UMR 9912) dans le groupe de recherche Analyse-Synthèse, sous la direction de Xavier Rodet : “Trompette et trompettiste : un système dynamique non linéaire à analyser, modéliser et simuler dans un contexte musical”.
Prix jeune chercheur AFAS 2000 (Association Française pour l’Avancement des Sciences)
- 1995 : DEA Instrumentation et Commande de l’université de Rouen
- 1992-1995 : École Supérieure d’Ingénieurs en Génie Électrique (ESIGELEC, Rouen)
- 1989-1992 : Classes préparatoires aux grandes écoles (option M)

Recherche et développement

- **2002-2010 : Chercheur CNRS section 9 au LMA** à Marseille (Laboratoire de Mécanique et d’Acoustique, UPR 7051) dans l’équipe Signaux Sonores et Musicaux. Recherches menées sur la physique des instruments de musique : expérimentation, modélisation, analyse des régimes d’oscillation. Applications principales visées : synthèse sonore et aide à la facture instrumentale traditionnelle.
- **2000-2001 : Chargé de recherche et de développement à l’Ircam** à Paris, dans le groupe de recherche Acoustique Instrumentale : recherche et développement de l’environnement MODALYS (représentation modale des propriétés acoustiques de divers objets et modélisation des mécanismes d’interaction entre ces objets), destiné à la synthèse sonore.
- **1999 : Chargé de recherche à l’Ircam** dans le groupe de recherche Analyse/Synthèse :
 - Dépôt d’un brevet concernant un procédé de simulation de la propagation non linéaire d’une onde acoustique dans un résonateur cylindrique.
 - Participation au développement d’un modèle physique de violon.
 - Conception d’une interface gestuelle de contrôle de la synthèse sonore, adaptée aux trompettistes.
 - Mise à niveau des versions Macintosh et Unix du programme d’analyse/synthèse *additive*.
- **1997 : Contrat CNET France Télécom** : analyse de deux bases de données de phonèmes, identification des différences et réalisation de filtres audio pour l’homogénéisation perceptive des deux bases de données.
- **1997 : Contrat PSA Peugeot-Citroën** : installation sur site de logiciels de l’*Ircam*
- **1994 : Stage développeur à ELF Aquitaine** (2 mois), département Image : développement d’une librairie de fonctions *C* pour la visualisation 3D à partir de programmes écrits en FORTRAN.

ENCADREMENT DE LA RECHERCHE

Thèse/Post-doctorat

- **2009-(...)** : **S. Karkar** (THÈSE UNIV. AIX-MARSEILLE 1 (DGA-CNRS)) : Instruments de musique auto-oscillants ; bifurcations des régimes périodiques (dir. B. Cochelin, co-dirigé sur demande dérogative).
- **2008-2009** : **B. Ricaud** (POST-DOCTORAT ANR CONSONNES) : Analyse théorique de systèmes non linéaires, spectre des instruments à anche (co-encadré avec Ph. Guillemain et J. Kergomard).
- **2005-2009** : **F. Silva** (THÈSE UNIV. AIX-MARSEILLE 1 (AMN)) : étude théorique et expérimentale des transitoires d'instruments de musique à anche simple (dir. J. Kergomard, co-encadré avec Ph. Guillemain).
- **2005-2006** : **D. Noreland** (POST-DOCTORAT MINISTÈRE) : analyse de l'auto-oscillation dans les instruments de type clarinette selon l'approche "modes non linéaires" (co-encadré avec S. Bellizzi).
- **2004-2007** : **A. Deblevid (née Lizée)** (THÈSE UNIV. AIX-MARSEILLE 1) : régimes d'oscillation et bifurcations dans les instruments de musique auto-entretenus (dir. C. Vergez, co-encadrée avec J. Kergomard). Thèse abandonnée pour raisons médicales.
- **2002-2003** : **S. Farner** (POST-DOCTORAT MOZART) : méthodes numériques de recherche de solutions périodiques (stables et instables) d'un système dynamique non linéaire autonome (co-encadré avec J. Kergomard).
- **2001-2006** : **A. Almeida** (THÈSE PARIS 6) : modélisation physique du fonctionnement d'instruments de type hautbois. Application à la synthèse sonore (dir. R. Caussé et X. Rodet). Thèse soutenue le 26/06/2006.

Encadrement d'étudiants (hors thèse et post-doctorat)

Stages d'ingénieurs/DEA

- **2010** : **B. Véricel** (MASTER ATIAM, 4 mois) : Trompette : comparaisons des régimes et bifurcations entre une bouche artificielle asservie et un modèle (co-encadré avec T. Helie).
- **2009** : **B. Véricel** (ENSEA, 3 mois) : Pilotage de la bouche artificielle asservie par Max-MSP et dispositif MIDI (co-encadré avec D. Ferrand).
- **2009** : **B. Vial** (ECM ET MASTER MARSEILLE, M2, 5 mois) : Réduction de modèles d'instruments à anche et de cuivres pour la synthèse sonore : approche par modes orthogonaux adaptés (Proper Orthogonal Decomposition) (co-encadré avec S. Bellizzi).
- **2008** : **A. Farcy** (MASTER MARSEILLE, M2, 4 mois) : Conception et mise en oeuvre d'un dispositif d'étude du rôle du conduit vocal dans le jeu du saxophone. (co-encadré avec Ph. Guillemain).

- **2006 : B. Mallaroni** (MASTER ACOUSTIQUE, 6 mois) : Effet de la géométrie de l'embouchure de trompette sur son spectre (co-encadré avec A. Lizée et J. Kergomard)
- **2005 : L. Guénel** (EGIM ET MASTER ACOUSTIQUE, 6 mois) : Estimation automatique des paramètres d'un modèle physique de trompette par la méthode d'optimisation du recuit simulé
- **2005 : E. Mévélec et R. Mockaer** (ENSAM, 6 mois) : développement (matériel et logiciel) d'un banc de mesure d'impédance acoustique d'entrée pour instruments à vent (co-encadré avec R. Caussé).
- **2004 : A. Lizée** (DEA ATIAM, 3 mois) : Etude du doublement de période dans les instruments à anche simple (co-encadrée avec J. Kergomard)
- **2004 : M. Coulon** (ESM2, 5 mois) : Etude expérimentale des propriétés des anches doubles (co-encadré avec A. Almeida)
- **2004 : D. Delpueyo** (DEA AIX-MARSEILLE II, 5 mois) : Simulation numérique (CAST3M) des équations de Navier-Stokes stationnaires dans des géométries d'instruments à anche simple (co-encadré avec O. Gipouloux)
- **2004 : C. Batifol et A. Gintz** (ENSIM, 2 mois) : Modélisation du couplage fluide-structure entre une anche d'instrument à vent et un fluide en écoulement, projet ingénieur (co-encadré avec O. Gipouloux)
- **2003 : T. Guimezanes** (ENSMA, 5 mois) : Simulation numérique des équations de Navier-Stokes dans des géométries d'instruments à anche (co-encadré avec O. Gipouloux)
- **2003 : C. Batifol** (ENSIM, 7 mois) : étude des propriétés visco-élastiques du feutre du marteau de piano (co-encadré avec R. Caussé)
- **2003 : N. Tournier et R. Leroy** (ESM2) : simulation numérique de la propagation acoustique faiblement non linéaire, projet ingénieur (co-encadré avec B. Cochelin)
- **2002 : C. Lecocq** (DEA AIX-MARSEILLE II, 6 mois) : inversion d'un modèle physique de clarinette (co-encadrée avec Ph. Guillemain)
- **2002 : O. Macherey** (CENTRALE, 6 mois) : étude expérimentale du comportement d'un jet turbulent dans un champ acoustique transverse périodique (co-encadré avec B. Fabre et R. Caussé)
- **2002 : E. Humbert** (CENTRALE ET DEA ATIAM, 7 mois) : synthèse sonore en temps réel de la corde frappée avec prise en compte du feutre du piano (co-encadré avec R. Caussé).
- **2001 : M. Georget et C. Fritz** (UTC, 6 mois) : banc d'impédance acoustique numérique pour instruments à vent (co-encadré avec R. Caussé).
- **2000 : G. Lemaître** (DEA LE MANS, 6 mois) : modèle physique d'instruments de type hautbois (co-encadré avec X. Rodet).
- **1999 : M. Duch** (UNIVERSITÉ DE BARCELONE, 6 mois) : conception d'un modèle physique de corde frottée (co-encadré avec X. Rodet).
- **1999 : P. Tisserand** (ENSEM, 6 mois) : portage sous *jMax* (environnement temps réel de l'*Ircam*) de modèles physiques de trompette, de clarinette et circuits de Chua.
- **1998 : T. Hélie** (DEA ORSAY-PARIS XI, 6 mois) : identification de paramètres d'un modèle physique de trompette en fonction d'un son enregistré.
- **1997 : B. Govignon** (DEA ATIAM, 6 mois) : fabrication d'une bouche artificielle avec lèvres en latex pour l'étude expérimentale de la production de sons de trompette.

Stages de second cycle

- **2010 : S. Terrien** (MASTER UPMC, M1, 3 mois) : Comparaison des transitions de régimes pour une flûte à bec jouée par un instrumentiste ou une bouche artificielle (co-encadré avec B. Fabre et D. Ferrand).
- **2007 : A. Farcy** (MASTER MARSEILLE, M1, 2 mois) : Mesure des rapports d'impédance entre conduit vocal et saxophone (co-encadré avec Ph. Guillemain).
- **2007 : A. Olivero et J.M. Binard** (MASTER MARSEILLE, M1, 2 mois) : Prototypage numérique d'un banc de mesure d'impédance acoustique (co-encadré avec D. Ferrand).
- **2007 : Y. Frutiger et A. Lechevalier** (MASTER MARSEILLE, M1, 2 mois) : Simulation numérique d'écoulements dans une géométrie de bec de clarinette (co-encadré avec Th. Scotti).
- **2006 : G. Vignon** (ENSEA, DEUXIÈME ANNÉE, 1 mois) : Décomposition modale de l'impédance d'entrée des instruments à vent : modes réels et modes complexes (co-encadré avec A. Deblevid et J. Kergomard)
- **2006 : J. Mathieu** (CENTRALE LYON, SECONDE ANNÉE, 3 mois) : Régulation de la pression d'alimentation dans une bouche artificielle pour instruments à vent. (co-encadrée avec D. Ferrand)
- **2005 : S. Hourcade** (MASTER 1, 3 mois) : mesure de raideurs équivalentes d'anches doubles sur une bouche artificielle - utilisation du traitement d'image (co-encadré avec A. Almeida)
- **2004 : C. Vern** (LICENSE, 2 mois) : mesure d'admittances mécaniques d'anches doubles (co-encadré avec A. Almeida)
- **2003 : S. Divoir** (MAÎTRISE, 4 mois) : calcul d'auto-oscillations par perturbation du mouvement de Helmholtz (co-encadré avec J. Kergomard)
- **2002 : L. Inovecky** (ESM2, 2 mois) : simulation numérique des équations de Navier-Stokes dans des géométries simples (co-encadré avec O. Gipouloux).
- **2001 : E. Humbert** (CENTRALE, 6 mois) : formalisation modale de l'interaction entre le marteau et la corde de piano

Stages de premier cycle

- **2007 : P. Lacote** (IUT MARSEILLE MESURES PHYSIQUES, DEUXIÈME ANNÉE, 3 mois) : Caractérisation expérimentale du couplage fluide structure dans un bec de clarinette (co-encadré avec D. Ferrand)

ENSEIGNEMENT

- **1995-98 : Chargé de cours, travaux dirigés et travaux pratiques (> 250 heures/an)** à l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Génie Electrique (ESIGELEC, Rouen), dans l'équipe *Informatique Industrielle* : architecture et fonctionnement des microprocesseurs, simulation/émulation d'applications embarquées pour processeurs Motorola 680x0.
- **1995-2004 : Chargé de cours** du DEA ATIAM (Université Paris 6) : langage *C* (6 heures)
- **2001 : Chargé de cours** du DEA ATIAM (Université Paris 6) : Synthèse sonore par modèles physiques (module de 4 heures)
- **2003-2004 : Travaux pratiques** lors de la semaine Paristech (regroupant les grandes écoles parisiennes) : expériences autour de la flûte : facture, auto-oscillation, rayonnement (3 heures)
- **2002-2004 : Chargé de cours** du DEA D'ACOUSTIQUE (Université Aix-Marseille 2) : Acoustique musicale et systèmes dynamiques (module de 6 heures)
- **2005-2007 : Chargé de cours** du DEA D'ACOUSTIQUE (Université Aix-Marseille 2) : Acoustique musicale et systèmes dynamiques (module de 8 heures)
- **2007 : Chargé de cours** à l'ECOLE CENTRALE DE PARIS : Modèles physiques d'instruments de musique à vent : de la synthèse sonore à l'analyse des régimes d'oscillation (3 heures)
- **2008-(...) : Responsable de module** du MASTER 2 D'ACOUSTIQUE (Université Aix-Marseille 2) : Physique des instrument de musiques (module de 24 heures)
- **2008-(...) : Chargé de cours** du MASTER 2 D'ACOUSTIQUE (Université Aix-Marseille 2), module Physique des instrument de musiques (20 heures)
- **2009-(...) : Chargé de cours** du MASTER 2 ATIAM (Université Pierre et Marie Curie), cours d'acoustique physique (12 heures)

LOGICIELS

Distribution libre

- Participation au projet "**Harmbal**" : logiciel libre permettant la recherche de solutions périodiques (stables ou instables) d'un système dynamique non linéaire autonome modélisant un instrument de musique entretenu par équilibrage harmonique. Rôle : encadrement de S. Farner, qui a écrit ce logiciel dans le cadre de son stage post-doctoral au LMA en 2002. Ce logiciel est distribué sous la licence CeCILL et disponible ici : <http://www.lma.cnrs-mrs.fr/logiciels/harmbal/>.
- Participation au projet "**Manlab**" (depuis 2004) : logiciel écrit initialement par R. Arquier en thèse (dir. B. Cochelin) visant à construire les diagrammes de bifurcations de systèmes non linéaires par l'utilisation de la MAN. Les dernières évolutions du logiciel (par S. Karkar, B. Cochelin et moi-même) apportent la possibilité de réaliser des calculs par équilibrage harmonique. Ce logiciel distribué sous licence CeCILL-C est disponible ici : <http://manlab.lma.cnrs-mrs.fr>.
- Participation au projet "**Moreesc**" : logiciel écrit par F. Silva durant sa thèse permettant le calcul des auto-oscillations dans les instruments à vent à anche et les cuivres. Les calculs reposent sur le formalisme modal (modes mécaniques de l'anche/lèvre, et modes acoustiques de l'instrument). Ce logiciel distribué sous licence CeCILL-C est disponible ici : <http://moreesc.lma.cnrs-mrs.fr/>.

Logiciels "commerciaux"

- Participation au projet "**Modalys**" en tant que chargé de recherche et développement (2000-2001) : représentation modale des propriétés acoustiques de divers objets et modélisation des mécanismes d'interaction entre ces objets. Ce logiciel destiné à la synthèse sonore est distribué dans le cadre du Forum Ircam (<http://forumnet.ircam.fr/701.html>), par l'équipe Acoustique Instrumentale de l'Ircam (<http://www.ircam.fr/instr.html>).
- Participation au projet "**Brass**" (2004-2005), mission d'expertise : l'objet du projet était de rendre accessible un ensemble de modèles physiques d'instruments à vent (trompette, trombone, et saxophone) sous forme de plug-ins commerciaux de séquenceurs audio. Le logiciel "Brass" résulte de la collaboration entre l'Ircam et la société Arturia. Des exemples sonores sont disponibles sur la page <http://www.arturia.com/evolution/en/products/brass/media.html#audio>.

DIVERS

Brevet

- "Procédé de simulation de la propagation non linéaire d'une onde acoustique, notamment dans un résonateur". (inventeurs : Vergez Christophe et Rodet Xavier), brevet délivré le 08/06/01 (N° 2792125)

Ce brevet délivré en Juin 2001 et étendu dans plusieurs pays depuis, fait l'objet d'un accord d'exploitation avec la société ARTURIA (logiciel BRASS) pour la simulation numérique du phénomène de cuivrage à fort niveau sonore observé lors du jeu de la trompette et du trombone.

Contrat de recherche

- Contrat *Decibel* : contrat à caractère strictement confidentiel. Partenaires : EPFG (Public), Sorghal (entreprise). Co-responsable (à 20% environ) au niveau du LMA.

Projets de recherche

- Projet ACI Cognitive, Ministère de la Recherche (2001-2002) : projet porté par le LMS (FRE 3324).
- Projet RIAM BRASS (2004-2005) : projet porté par l'Ircam et la société Arturia.
- Projet ANR CONSONNES (2006-2009) : projet par J. Kergomard (LMA, UPR7051)
- Projet ECOS-Sud Chili (2009-2011) : Les flûtes pré-hispaniques : une étude acoustique organologique et anthropologique. Projet porté par B. Fabre (IJLRD, UMR7190).
- Projet ANR SDNS-AIMV (2010-2013) : projet porté par A. Almeida (LAUM, UMR6613).

Administration de la recherche

- Création et animation depuis 2002 de l'opération de recherche "Physique des instruments de musique" au LMA (<http://www.lma.cnrs-mrs.fr/article29.html>)
- Co-responsable scientifique (avec R. Caussé, Ircam), du volet "Bouche artificielle robotisée" du projet ANR CONSONNES (contrôle des sons naturels et synthétiques), porté par J. Kergomard, LMA (projet Blanc de décembre 2005 à mai 2009, <http://www.consonnes.cnrs-mrs.fr>). A ce titre, organisation de plusieurs journées scientifiques de travail, et du colloque final (Aussois, 6-9 janvier 2009).
- Membre (élu) du conseil de laboratoire du LMA depuis 2006.
- Participation à une société savante : élu depuis janvier 2005 membre du Groupe Spécialisé d'Acoustique Musicale (GSAM) de la Société Française d'Acoustique (SFA), et secrétaire depuis janvier 2007. L'objectif du GSAM est de promouvoir l'acoustique musicale au sein de

la communauté scientifique et au-delà. Les actions menées sont de différents types : organisation de journées scientifiques (environ 4 ou 5 par an), organisation de journées de rencontre entre scientifiques, musiciens, et professionnels de la facture instrumentale, opérations de vulgarisation, bourses d'aide aux doctorants pour assister à des congrès Des informations plus précises sont disponibles sur le site du GSAM : [http ://www.sfa.asso.fr/fr/gsam/](http://www.sfa.asso.fr/fr/gsam/)

Organisation de la recherche

- Organisateur de sessions invitées dans plusieurs conférences nationales et internationales : SCI'2001 (*Systemics Cybernetics and Informatics*, Orlando, Floride), CFA'06 (*Congrès Français d'Acoustique*, Tours, France), ICA'07 (International Congress of Acoustics, Madrid, Espagne), CFA'10 (Congrès Français d'Acoustique, Lyon, France).
- Membre du comité d'organisation du congrès "Modes non linéaires" (journées EUROMECH 457, [http ://w3lma.cnrs-mrs.fr/EUROMECH457/](http://w3lma.cnrs-mrs.fr/EUROMECH457/)), Juin 2004, Fréjus, France.
- Organisateur des JPPIM'08 (Journées Pédagogiques en Physique des Instruments de Musique, Marseille, 23/24/25 janvier 2008). Stage de formation à destination des enseignants de physique du secondaire (collèges/lycées), financé par le Rectorat d'Aix-Marseille et inscrit à son plan de formation.